



**Mário Rui Leonardo Martinho**

Licenciado em Engenharia Civil

## **Vigas de Aço Alveoladas: Análise e Dimensionamento Estrutural**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia

Orientador: Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida

Júri:

Presidente: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos

Arguente: Professor Doutor Rodrigo de Moura Gonçalves

Vogal: Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro 2014**



*Copyright* Mário Rui Leonardo Martinho, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# **Agradecimentos**

A concretização desta dissertação não teria sido possível sem a contribuição de várias pessoas, às quais devo os mais sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador Professor Doutor João Rocha de Almeida, pela disponibilidade e conhecimento transmitido,

Aos meus Amigos e Colegas, agradeço o apoio e amizade demonstrada ao longo deste percurso académico,

Por fim, um especial agradecimento aos meus Pais, Irmãos e Namorada pelo apoio e força.

Um Muito Obrigado!!



## Resumo

As vigas de aço alveoladas podem ser fabricadas a partir de perfis laminados a quente e possuem vantagens como: maior rigidez a flexão, possibilidade de passagem de dutos de instalações pelas aberturas, maior penetração de luz natural e bom aspeto estético. Devido à presença de aberturas na alma da viga, podem ocorrer diversos modos de colapso, que dependem da geometria da viga, das dimensões das aberturas, do tipo de carregamento e das condições de fronteira. A sua geometria flexível permite diversas configurações, sendo desejável que o projeto conduza a soluções eficientes e económicas. Para tal, o conhecimento do comportamento estrutural destas vigas é de fundamental importância. Neste trabalho, abordam-se diversos aspetos específicos deste tipo de vigas e discutem-se as correspondentes metodologias de dimensionamento.

**Palavras-chave:** estruturas de aço, vigas alveoladas, vigas mistas, aberturas na alma, viga Vierendeel, encurvadura da alma entre aberturas.





# Abstract

Cellular steel beams are fabricated from standard hot-rolled I-sections and have many advantages such as: greater bending stiffness, ease of services through the web openings, increase of natural light inside the buildings and good aesthetic appearance. However, the presence of openings in the web of these beams leads to additional failure modes that depend on the beam geometry, size of web openings, type of loading and lateral restraints. Their flexible geometry allows diverse combinations, being desirable that the design would result in efficient and economical solutions. Thus, knowledge of the structural behavior of such beams is of fundamental importance. In this work, attention is given to several specific aspects of this type of beams and to the correspondent design methodologies.

**Keywords:** steel structures, cellular beams, steel-concrete composite beams, web openings, Vierendeel beam, web-post buckling.



# Simbologia

## Símbolos Latinos

|               |   |
|---------------|---|
| $A_{bT}$      | Área da secção transversal do T inferior                                  |
| $A_{tT}$      | Área da secção transversal do T superior                                  |
| $A_c$         | Área da secção transversal de betão                                       |
| $A_f$         | Área do banzo da secção em T  |
| $A_{sl}$      | Área da armadura longitudinal (chapa perfilada nervurada)                 |
| $A_{sf}$      | Área da armadura transversal  |
| $A_{s,min}$   | Área da secção mínima de armaduras  |
| $A_v$         | Área de corte do perfil metálico  |
| $A_{v,bT}$    | Área de corte do T inferior   |
| $A_{v,tT}$    | Área de corte do T superior   |
| $A_{w,b}$     | Área da alma do T inferior  |
| $A_{w,T}$     | Área da alma da secção em T   |
| $b$           | Largura do banzo comprimido   |
| $b_{eff,0}$   | Largura efetiva da laje de betão  |
| $b_f$         | Largura do banzo do perfil metálico                                       |
| $b_o$         | Largura mínima de uma nervura   |
| $b_w$         | Largura efetiva da laje de betão  |
| $d$           | Diâmetro do conector de corte   |
| $e_0$         | Excentricidade da abertura em relação ao eixo longitudinal da viga        |
| $E_s$         | Módulo de elasticidade do aço   |
| $E_{cm}$      | Módulo de elasticidade secante do betão                                   |
| $E_{c,eff}$   | Módulo de elasticidade homogeneizado                                      |
| $f_{cd}$      | Valor de cálculo da tensão de rotura do betão                             |
| $f_{ck}$      | Valor característico da tensão de rotura do betão em provetes cilíndricos |
| $f_{ck,cube}$ | Valor característico da tensão de rotura do betão em provetes cúbicos     |
| $f_u$         | Tensão última dos conectores de corte                                     |
| $f_y$         | Tensão de cedência dos conectores de corte                                |
| $h$           | Altura da viga alveolada  |
| $h_b$         | Altura do T inferior  |

|                |   |
|----------------|---|
| $h_t$          | Altura do T superior  |
| $h_c$          | Altura da laje de betão acima das nervuras  |
| $h_d$          | Altura das nervuras   |
| $h_{eff}$      | Altura efetiva entre os centros de gravidade dos T's  |
| $h_o$          | Altura da abertura  |
| $h_s$          | Altura total da laje mista  |
| $h_{s,eff}$    | Altura efetiva da laje de betão para efeitos de punçoamento   |
| $h_{sc}$       | Altura nominal do conector de corte   |
| $h_w$          | Altura da alma da viga alveolada  |
| $h_{wb}$       | Altura da alma do T inferior  |
| $h_{wt}$       | Altura da alma do T superior  |
| $h_{wT}$       | Altura da alma da secção em T   |
| $I_y$          | Momento de inércia da secção mista relativamente ao eixo y  |
| $I_{y,0}$      | Momento de inércia da secção mista relativamente ao eixo y, considerando as aberturas na viga alveolada |
| $k_o$          | Fator de redução em flexão de Vierendeel  |
| $k_t$          | Fator de redução para nervuras perpendiculares relativamente ao eixo longitudinal da viga               |
| $k_{t,max}$    | Fator de redução máximo para nervuras   |
| $l_e$          | Comprimento equivalente de uma abertura retangular  |
| $l_o$          | Comprimento de uma abertura   |
| $l_{o,eff}$    | Comprimento equivalente da abertura para efeitos de classificação transversal                           |
| $l_w$          | Comprimento de encurvadura entre aberturas  |
| $L$            | Comprimento do vão da viga entre apoios   |
| $L_e$          | Comprimento equivalente do vão  |
| $M_{pl,a,Rd}$  | Momento fletor resistente da viga alveolada   |
| $M_{bT,NV,Rd}$ | Momento fletor resistente reduzido do T inferior devido a esforço axial                                 |
| $M_{tT,NV,Rd}$ | Momento fletor resistente reduzido do T superior devido a esforço axial                                 |
| $M_{el,Rd}$    | Momento fletor resistente elástico na secção em T   |
| $M_{Ed}$       | Valor de cálculo do momento fletor  |
| $M_{pl,N,Rd}$  | Momento fletor resistente plástico reduzido na secção em T  |
| $M_{pl,Rd}$    | Momento fletor resistente plástico na secção em T   |
| $M_{o,Ed}$     | Valor de cálculo do momento fletor na abertura  |
| $M_{o,Rd}$     | Momento fletor resistente da secção mista na abertura   |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $M_{wp,Ed}$        | Momento fletor atuante na secção entre aberturas  |
| $M_{wp,Rd}$        | Momento fletor resistente na secção entre aberturas   |
| $N_{bT,Ed}$        | Esforço de tração atuante no T inferior   |
| $N_{bT,Rd}$        | Esforço de tração resistente no T inferior  |
| $N_{bT,Rd}$        | Esforço de axial resistente no T superior   |
| $N_{a,Rd}$         | Esforço de tração resistente da viga alveolada  |
| $N_{c,Ed}$         | Esforço de compressão atuante no banzo de betão   |
| $N_{c,Rd}$         | Esforço de compressão resistente do betão na presença de conectores de corte  |
| $N_{c,s,Rd}$       | Esforço de compressão resistente do betão em conexão total  |
| $N_{wp,Rd}$        | Esforço de compressão atuante na secção entre aberturas   |
| $\Delta N_{b,Ed}$  | Esforço de tração adicional no T inferior em aberturas adjacentes   |
| $\Delta N_{co,Rd}$ | Esforço de compressão adicional da laje de betão, devido aos conectores de corte colocados ao longo da abertura               |
| $\Delta N_{cs,Rd}$ | Esforço de compressão adicional da laje de betão, devido aos conectores de corte colocados ao longo da secção entre aberturas |
| $n$                | Coefficiente de homogeneização; Número de conectores de corte   |
| $n_f$              | Número de conectores de corte necessários para conexão total  |
| $n_r$              | Número de conectores de corte colocados por cada nervura da chapa perfilada   |
| $n_{sc}$           | Número de conectores de corte entre o centro de gravidade da abertura e o apoio   |
| $n_{sc,o}$         | Número de conectores de corte colocados na abertura   |
| $n_{sc,s}$         | Número de conectores de corte colocados entre o centro geométrico de duas aberturas   |
| $P_{Ed}$           | Esforço de corte atuante em um conector de corte  |
| $P_{Rd}$           | Esforço de corte resistente de um conector de corte   |
| $r$                | Raio de concordância do perfil metálico   |
| $r_0$              | Raio do canto de uma abertura retangular  |
| $s$                | Distância entre eixos de aberturas  |
| $s_e$              | Distância da extremidade da viga metálica à primeira abertura   |
| $s_0$              | Distância entre as extremidades de duas aberturas adjacentes  |
| $s_{sc}$           | Espaçamento transversal entre conectores de corte   |
| $s_{sc,l}$         | Espaçamento longitudinal entre conectores de corte  |
| $t_f$              | Espessura do banzo da secção em T   |
| $t_w$              | Espessura da alma da secção em T  |
| $t_{w,eff}$        | Espessura efetiva da alma do T devido ao esforço transversal  |

|             |   |
|-------------|---|
| $V_b$       | Esforço transverso atuante no T inferior                                    |
| $V_{b,Rd}$  | Esforço transverso resistente do T inferior                                 |
| $V_{c,Rd}$  | Esforço de corte resistente da laje de betão em uma abertura                |
| $V_{Ed}$    | Esforço transverso atuante  |
| $V_{Rd}$    | Esforço transverso resistente   |
| $V_{t,Rd}$  | Esforço transverso resistente do T superior                                 |
| $V_{wp,Ed}$ | Esforço de corte longitudinal atuante                                       |
| $V_{wp,Rd}$ | Esforço de corte longitudinal resistente                                    |
| $x$         | Distância do centro da abertura ao apoio mais próximo                       |
| $z_c$       | Altura de betão em compressão   |
| $z_{el}$    | Altura entre a extremidade do banzo e o centro de gravidade da secção em T  |
| $z_{pl}$    | Altura entre a extremidade do banzo e o eixo neutro plástico da secção em T |

## Símbolos Gregos

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\gamma_G$      | Coeficiente parcial relativo às ações permanentes                                 |
| $\gamma_{M0}$   | Coeficiente parcial de segurança para secções de aço                              |
| $\gamma_{M1}$   | Coeficiente parcial de segurança para secções de aço sujeitas a encurvadura       |
| $\gamma_{Q,1}$  | Coeficiente de majoração relativo à ação variável de base                         |
| $\gamma_Q$      | Coeficiente parcial relativo às ações variáveis                                   |
| $\gamma_c$      | Coeficiente parcial de segurança para secções de betão                            |
| $\gamma_v$      | Coeficiente parcial de segurança devido à conexão de corte                        |
| $\delta_{add}$  | Deformação adicional devido às aberturas  |
| $\delta_b$      | Deformação devida a uma carga unitária numa viga simplesmente apoiada             |
| $\theta_f$      | Ângulo da escora comprimida do betão  |
| $\bar{\lambda}$ | Esbelteza adimensional  |
| $\nu_{Ed}$      | Tensão de corte longitudinal na ligação entre o betão com a viga alveolada        |
| $\rho_l$        | Taxa de armaduras longitudinais   |
| $\sigma_{cp}$   | Tensão de compressão no betão devida a esforço normal ou ao pré-esforço           |
| $\psi_{0,i}$    | Coeficiente de combinação associado às ações variáveis $i$                        |
| $\nu$           | Coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal |
| $\chi$          | Coeficiente de redução para a encurvadura por flexão                              |
| $\alpha$        | Coeficiente de redução devido ao processo construtivo                             |
| $\delta$        | Deformação da viga  |

|               |                          |
|---------------|--------------------------|
| $\varepsilon$ | Extensão                 |
| $\eta$        | Grau de conexão de corte |





# Abreviaturas

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>DEC</b>        | Departamento de Engenharia Civil                            |
| <b>SCI</b>        | Steel Construction Institute                                |
| <b>INSdag</b>     | Institute for Steel Development & Growth                    |
| <b>T</b>          | Parte de uma viga alveolada acima ou abaixo de uma abertura |
| <b>T Inferior</b> | Parte da viga alveolada abaixo de uma abertura              |
| <b>T Superior</b> | Parte da viga alveolada acima de uma abertura               |



# Índice

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Resumo.....</b>   | <b>vii</b>   |
| <b>Abstract.....</b>   | <b>ix</b>    |
| <b>Abreviaturas.....</b>   | <b>xvii</b>  |
| <b>Índice.....</b>   | <b>xix</b>   |
| <b>Índice de Figuras.....</b>  | <b>xxiii</b> |
| <b>Índice de Quadros.....</b>  | <b>xxv</b>   |
| <b>1. Introdução .....</b>   | <b>1</b>     |
| 1.1 Enquadramento Geral .....  | 1            |
| 1.2 Objetivos .....  | 2            |
| 1.3 Organização da Dissertação .....                                       | 2            |
| <b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>                                       | <b>5</b>     |
| 2.1 Considerações Gerais.....  | 5            |
| 2.2 Composição e Resistência Mecânica .....                                | 6            |
| 2.3 Processo de Fabrico .....  | 7            |
| 2.4 Vantagens, Desvantagens e Aplicação das Vigas Alveoladas .....         | 9            |
| 2.4.1 Vantagens.....   | 9            |
| 2.4.2 Desvantagens .....   | 10           |
| 2.4.3 Campos de Aplicação .....  | 10           |
| 2.5 Modos de Rotura.....   | 11           |
| 2.5.1 Considerações Gerais.....  | 11           |
| 2.5.2 Mecanismo de Flexão .....  | 12           |
| 2.5.3 Encurvadura Lateral por Flexão-Torção .....                          | 12           |
| 2.5.4 Mecanismo de Vierendeel.....   | 13           |
| 2.5.5 Esforço de Corte Longitudinal.....                                   | 14           |
| 2.5.6 Encurvadura da Alma por Esforço Transverso .....                     | 14           |
| 2.5.7 Encurvadura da Alma por Compressão .....                             | 15           |
| <b>3. Dimensionamento aos Estados Limite Últimos e de Utilização .....</b> | <b>17</b>    |
| 3.1 Enquadramento Normativo .....  | 17           |
| 3.2 Generalidades.....   | 17           |
| 3.2.1 Viga de Vierendeel .....   | 19           |
| 3.2.2 Simplificações do Modelo de Dimensionamento .....                    | 19           |
| 3.2.3 Pré-dimensionamento Geométrico.....                                  | 20           |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.2.3.1 | Parâmetros Geométricos.....   | 20 |
| 3.2.3.2 | Limites Geométricos.....  | 20 |
| 3.3     | Combinação de Ações.....  | 21 |
| 3.3.1   | Estados Limite Últimos.....   | 22 |
| 3.3.2   | Estados Limite de Utilização.....                                   | 22 |
| 3.4     | Materiais.....  | 22 |
| 3.4.1   | Aço.....  | 22 |
| 3.4.2   | Betão.....  | 23 |
| 3.5     | Viga Alveolada Mista.....   | 24 |
| 3.5.1   | Conectores de Corte.....  | 24 |
| 3.5.2   | Largura Efetiva da Laje de Betão.....                               | 26 |
| 3.5.3   | Conexão de Corte.....   | 27 |
| 3.5.3.1 | Grau Mínimo de Conexão de Corte.....                                | 28 |
| 3.5.4   | Armadura Transversal.....   | 28 |
| 3.6     | Momento Fletor nas Aberturas.....                                   | 30 |
| 3.6.1   | Equilíbrio de Forças Internas.....                                  | 31 |
| 3.6.1.1 | Eixo Neutro Plástico na Laje de Betão.....                          | 31 |
| 3.6.1.2 | Eixo Neutro Plástico no T Superior.....                             | 33 |
| 3.7     | Esforço Transverso.....   | 34 |
| 3.7.1   | Esforço Transverso Resistente na Abertura.....                      | 34 |
| 3.7.2   | Esforço Transverso Resistente da Laje de Betão.....                 | 35 |
| 3.8     | Momento de Vierendeel.....  | 36 |
| 3.8.1   | Classificação da Secção Transversal.....                            | 37 |
| 3.8.1.1 | Classificação dos Banzos.....                                       | 38 |
| 3.8.1.2 | Classificação da Alma.....  | 39 |
| 3.8.2   | Efeito do Esforço Axial na Classificação da Secção Transversal..... | 40 |
| 3.8.3   | Diminuição da Espessura de Alma devida ao Esforço Transverso.....   | 41 |
| 3.8.4   | Momento Fletor Resistente Plástico.....                             | 42 |
| 3.8.5   | Momento Fletor Resistente Elástico.....                             | 43 |
| 3.8.6   | Momento Fletor Resistente Local em Vigas Alveoladas Mistas.....     | 44 |
| 3.9     | Esforço de Corte Longitudinal.....                                  | 46 |
| 3.10    | Momento Fletor na Alma entre Aberturas.....                         | 47 |
| 3.10.1  | Momento Fletor Resistente na Alma entre Aberturas.....              | 48 |
| 3.11    | Encurvadura da Alma entre Aberturas.....                            | 49 |
| 3.11.1  | Verificação da Encurvatura entre Aberturas Afastadas.....           | 50 |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.11.2    | Verificação da Encurvadura para Aberturas Adjacentes .....              | 51        |
| 3.12      | Limitação do Esforço Transverso Resistente.....                         | 52        |
| 3.12.1    | Esforço Transverso Resistente em Vigas com Aberturas Circulares .....   | 53        |
| 3.12.2    | Esforço Transverso Resistente em Vigas com Aberturas Retangulares ..... | 53        |
| 3.12.3    | Encurvadura entre Aberturas .....                                       | 54        |
| 3.13      | Encurvadura Lateral com Torção.....                                     | 54        |
| 3.14      | Estados Limite de Utilização .....                                      | 56        |
| 3.14.1    | Estado Limite de Deformação .....                                       | 56        |
| 3.14.2    | Estado Limite de Largura de Fendas.....                                 | 59        |
| 3.14.3    | Estado Limite de Vibração.....  | 60        |
| <b>4.</b> | <b>Caso de Estudo.....</b>  | <b>61</b> |
| 4.1       | Descrição do Problema .....   | 61        |
| 4.2       | Dimensões Geométricas e Propriedades dos Materiais .....                | 61        |
| 4.2.1     | Dimensões Geométricas.....  | 61        |
| 4.2.2     | Propriedades dos Materiais .....  | 63        |
| 4.3       | Combinação de Ações.....  | 64        |
| 4.4       | Estados Limite Últimos.....   | 64        |
| 4.4.1     | Conexão de Corte.....   | 65        |
| 4.4.1.1   | Grau de Conexão.....  | 67        |
| 4.4.2     | Classificação da Secção Transversal.....                                | 69        |
| 4.4.3     | Momento Fletor na Abertura .....  | 70        |
| 4.4.4     | Armadura Transversal e Armadura de Fendilhação.....                     | 71        |
| 4.4.4.1   | Armadura de Fendilhação .....   | 71        |
| 4.4.4.2   | Armadura Transversal.....   | 72        |
| 4.4.5     | Esforço Transverso .....  | 73        |
| 4.4.6     | Momento Fletor de Vierendeel .....                                      | 75        |
| 4.4.7     | Esforço de Corte Longitudinal entre Aberturas .....                     | 77        |
| 4.4.8     | Momento Fletor entre Aberturas.....                                     | 78        |
| 4.4.9     | Encurvadura entre Aberturas .....                                       | 78        |
| 4.4.10    | Limitação do Esforço Transverso .....                                   | 80        |
| 4.4.11    | Faseamento Construtivo.....   | 81        |
| 4.5       | Estados Limite de Utilização .....                                      | 83        |
| 4.5.1     | Deformação.....   | 83        |
| 4.5.2     | Vibração.....   | 86        |
| 4.6       | Comparação de Resultados .....  | 88        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....</b> | <b>93</b> |
| 5.1 Conclusões .....                                  | 93        |
| 5.2 Desenvolvimentos Futuros .....                    | 94        |
| <b>Referências Bibliográficas .....</b>               | <b>95</b> |
| <b>Anexos .....</b>                                   | <b>I</b>  |

# Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Processo de corte e soldadura de vigas alveoladas (Grünbauer, 2010) .....  | 5  |
| Figura 2 - Padrões geométricos de vigas alveoladas: Celular, Castelar e Angelina (Adaptado de ArcelorMittal, 2010) .....                              | 6  |
| Figura 3 - Vigas alveoladas: a) Mista; b) Aço (ArcelorMittal, 2011; GraySon, 2012).....   | 7  |
| Figura 4 - Vigas alveoladas de inércia variável com banzo e alma soldados (Bruning Tecnometal, 2007) .....  | 8  |
| Figura 5 - Processo de produção de vigas celulares com aberturas circulares (Gerdau Açominas, 2011) .....   | 8  |
| Figura 6 - Passagem de instalações em vigas alveoladas (Oliveira, 2011; Westok, 2008)....   | 10 |
| Figura 7 - a) Vigas alveoladas de dupla curvatura; b) Aplicação de vigas alveoladas no Estádio Cidade de Coimbra (Westok, 2012; Abecassis, 2011)..... | 11 |
| Figura 8 - Modos de colapso em vigas alveoladas (Lawson e Hicks 2011) .....   | 12 |
| Figura 9 - Encurvadura lateral com torção (Ahmed, 2004; Bezerra, 2011).....   | 13 |
| Figura 10 - Mecanismo de Vierendeel (Veríssimo, 1996; Tsavdaridis e D´mello, 2011) .....  | 14 |
| Figura 11 - Rotura da junta de soldadura entre aberturas (Tsavdaridis e D´mello, 2011) .....  | 14 |
| Figura 12 - Encurvadura da alma por corte (Kerdal e Nethercot, 1984; Nadjai et al., 2008)   | 15 |
| Figura 13 - Encurvadura da alma por compressão (Erdal, 2012) .....  | 15 |
| Figura 14 - Analogia da viga alveolada com viga Vierendeel (Veríssimo et al., 2013).....  | 19 |
| Figura 15 - Parâmetros geométricos de vigas alveoladas (Lawson e Hicks, 2011) .....   | 20 |
| Figura 16 - Variação de tensões longitudinais ao longo da secção transversal (Calado e Santos, 2010) .....  | 26 |
| Figura 17 - Tensões devidas ao momento fletor plástico numa abertura (SCI-P355, 2011) .   | 42 |
| Figura 18 - Tensões devidas ao momento fletor elástico na abertura (SCI-P355, 2011).....  | 43 |
| Figura 19 - Efeito da flexibilidade de uma abertura alongada (Lawson et al., 2006).....   | 45 |
| Figura 20 - Equilíbrio de forças e momentos entre aberturas circulares (SCI-P355, 2011) ..  | 46 |
| Figura 21 - Tensões de compressão entre aberturas circulares (Lawson et al., 2006) .....  | 49 |
| Figura 22 - Encurvadura entre aberturas afastadas (SCI-P355, 2011).....   | 50 |
| Figura 23 - Encurvadura entre aberturas adjacentes (SCI-P355, 2011).....  | 51 |
| Figura 24 – Deformações numa viga alveolada devidas ao momento fletor e ao esforço transversal (SCI-P355, 2011).....                                  | 57 |
| Figura 25 –Esboço da viga alveolada a analisar .....  | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 26- Resultados do programa da ArcelorMittal para estados limite últimos: grau de conexão e relação dos esforços atuantes com a capacidade resistente .....  | 89 |
| Figura 27- Resultados do programa da ArcelorMittal para estados limite de utilização: deformação da viga alveolada mista e frequências naturais da estrutura ..... | 89 |



# Índice de Quadros

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1-Limites dimensionais para vigas alveoladas (Lawson e Hicks, 2011; ENV 1993-1-1 Annex N, 1998).....                             | 21 |
| Quadro 2-Tensão de cedência e tensão última de aço (EN 100025-2, 2010).....   | 23 |
| Quadro 3-Resistências características e módulo de elasticidade de cada classe de betão (EN 1992-1-1, 2010).....                         | 23 |
| Quadro 4 -Valores máximos admissíveis de $K_t$ (SCI-P355, 2011) .....   | 25 |
| Quadro 5-Valores limite das esbeltezas para a classificação dos banzos (EN 1993-1-1, 2010) .....  | 39 |
| Quadro 6-Classificação da alma de uma secção em T (ENV 1993-1-1 Annex N, 1998).....   | 40 |
| Quadro 7 - Valores mínimos admissíveis de frequências próprias de vigas mistas (Calado e Santos, 2010).....                             | 60 |
| Quadro 8-Propriedades geométricas .....   | 62 |
| Quadro 9-Propriedades do perfil IPE 450 expandido .....   | 62 |
| Quadro 10-Admissibilidade das dimensões da viga alveolada .....   | 63 |
| Quadro 11-Propriedade dos materiais.....  | 63 |
| Quadro 12-Ações permanentes e variáveis.....  | 64 |
| Quadro 13-Valores de dimensionamento da combinação fundamental.....   | 64 |
| Quadro 14-Esforços atuantes na viga alveolada .....   | 65 |
| Quadro 15-Distribuição dos conectores de corte .....  | 66 |
| Quadro 16-Propriedades geométricas da secção em T .....   | 67 |
| Quadro 17-Ações permanentes e variáveis.....  | 83 |
| Quadro 18-Valor de cálculo da combinação característica.....  | 83 |
| Quadro 19-Coeficiente $k_o$ para aberturas com e sem reforços longitudinais .....   | 86 |
| Quadro 20-Ações para combinação frequente .....   | 86 |
| Quadro 21-Grau de conexão, relação dos esforços atuantes com a capacidade resistente, deformada da estrutura e frequência natural ..... | 90 |



# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento Geral

Após a Segunda Guerra Mundial, surgem as primeiras vigas com aberturas sequenciais na alma, criadas a partir de necessidades estruturais de redução de peso e simplificação dos critérios de resistência aos esforços atuantes. Tais vigas são fabricadas a partir de perfis laminados a quente, com aberturas padronizadas na alma. Estas aberturas são denominadas de alvéolos, motivo pelo qual tais vigas são geralmente designadas por vigas alveoladas. As primeiras vigas de aberturas sequenciais, desenvolvidas por Geoffrey Boyd, foram denominadas vigas casteladas, em função de sua aparência semelhante às muralhas de um castelo medieval. Por vezes, foram também chamadas de vigas colmeia, pelo fato dos seus furos lembrarem os favos de uma colmeia. Fazem ainda parte do grupo das vigas alveoladas as chamadas vigas celulares, cujas aberturas são circulares. As vigas celulares surgiram algum tempo após as vigas casteladas, na sequência do desenvolvimento dos equipamentos de corte e soldadura dos perfis de aço. Todas as vigas referidas acima são também denominadas na literatura técnica como “vigas de alma expandida” (Cobenge, 2013; Silveira, 2011).

Em projeto de estruturas, limitações de altura são frequentemente impostas a edificações de múltiplos pisos, por exigências dos regulamentos de loteamento urbano, por aspetos económicos e por considerações estéticas. Para se proporcionar a passagem de condutas e dutos de grande diâmetro sob vigas de aço, um pé-direito alto é normalmente requerido, conduzindo muitas vezes a alturas entre pisos inaceitáveis (Rodrigues, 2007).

No projeto de uma estrutura, há que ter em conta, não apenas considerações de segurança, como também os requisitos funcionais baseados na utilização a que se destina a estrutura. Em geral, numa estrutura de um edifício de aço, as suas vigas e madres não possuem quaisquer

aberturas. Este arranjo dificulta a passagem de condutas e dutos de ar condicionado, necessários ao funcionamento satisfatório do edifício. Várias são as soluções possíveis para resolver este inconveniente, tais como: treliças, vigas de inércia variável, vigas mistas e vigas alveoladas. Esta última alternativa permite uma profundidade de construção menor, com a colocação de serviços e tubagens dentro da profundidade da viga, em locais apropriados. Contudo, a introdução de aberturas na alma da viga altera a distribuição das tensões no elemento estrutural e influencia o seu modo de colapso (Insdag, 2006). Assim, são necessários métodos específicos para analisar e projetar este tipo de vigas.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar e compreender, com base em modelos analíticos e numéricos, os princípios da conceção e verificação da segurança apresentados na norma europeia para estruturas de aço atualmente em vigor, a NP EN 1993-1-1, e na norma britânica de dimensionamento SCI-P355: Design of Composite Beams with Large Web Openings (Lawson e Hicks, 2011), baseada na pré-norma ENV 1993-1-1:1998, Annex N. Os métodos de análise e dimensionamento estrutural estudados podem ser aplicados em vigas alveoladas com aberturas circulares ou retangulares. Os principais fenómenos associados a esta tipologia de vigas são o comportamento em viga de Vierendeel e a encurvadura da alma entre as aberturas, os quais serão abordados de forma detalhada ao longo desta dissertação.

## 1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

### Capítulo 1

Neste capítulo é feita uma breve introdução histórica do tema, apresentando-se ainda os objetivos e a organização da dissertação.

### Capítulo 2

Neste capítulo, é feita uma caracterização das vigas alveoladas, descrevendo as suas propriedades geométricas, resistência mecânica, processos de fabrico e campos de aplicação. Por último, são também analisados os modos de rotura deste tipo de vigas.

### **Capítulo 3**

Neste capítulo, descreve-se a metodologia para verificação da segurança e dimensionamento de vigas alveoladas metálicas e mistas aos Estados Limite Últimos, com base na norma SCI-P355 e de acordo com as normas EN 1990, 1991, 1992, 1993 e 1994. Também neste capítulo são apresentadas as verificações aos Estados Limite de Utilização em vigas alveoladas metálicas e mistas. Os Estados Limite de Utilização considerados são: a deformação total da viga, a fendilhação do betão e a vibração.

### **Capítulo 4**

Neste capítulo, procede-se à aplicação das metodologias de dimensionamento abordadas em capítulos anteriores, comparando-as ainda com outro método de dimensionamento, o programa ACB disponibilizado pela empresa ArcelorMittal.

### **Capítulo 5**

Neste último capítulo, são apresentadas as principais conclusões do estudo realizado e apontam-se algumas sugestões para desenvolvimentos futuros acerca deste tema.



## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Considerações Gerais

As vigas alveoladas são obtidas a partir de perfis de aço laminados, geralmente em I ou H, os quais são cortados longitudinalmente segundo um traçado sinuoso. As metades obtidas após o corte são soldadas depois de deslocadas de um certo comprimento, resultando em vigas com altura superior à do perfil original, com o mesmo peso, com múltiplas aberturas e momento fletor resistente e a rigidez superiores às dos perfis originais. Na Figura 1, é esquematizado o processo de fabrico de vigas alveoladas.

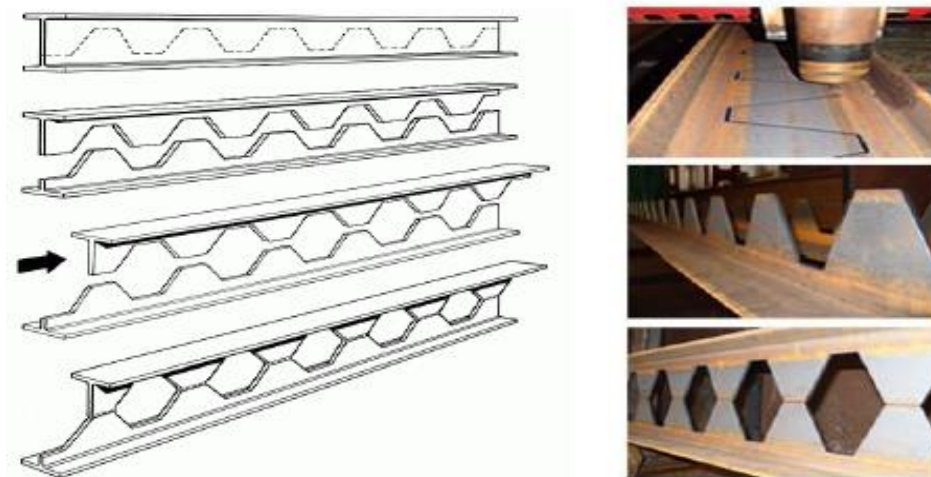


Figura 1 - Processo de corte e soldadura de vigas alveoladas (Grünbauer, 2010)

O traçado do corte pode apresentar vários padrões geométricos, como se pode observar na Figura 2. O padrão de corte mais comum faz lembrar os dentes de uma engrenagem ou a crista

típica das muralhas dos castelos medievais, dando origem às chamadas vigas casteladas. Os avanços tecnológicos incorporados nas máquinas de corte com comando numérico computadorizado têm possibilitado a diminuição no tempo de fabrico e criação de diversos padrões de corte, sendo atualmente frequentes as chamadas vigas celulares, com aberturas circulares (Silveira, 2011).

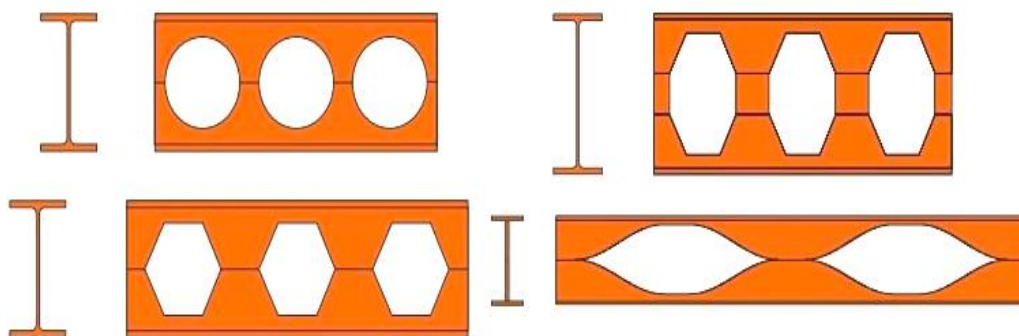


Figura 2 - Padrões geométricos de vigas alveoladas: Celular, Castelar e Angelina (Adaptado de ArcellorMittal, 2010)

Os padrões de corte estabelecidos têm por finalidade expandir a altura do perfil original, geralmente em cerca de 50%. Contudo, outras percentagens de expansão podem ser estabelecidas, desde que as condições de resistência da viga sejam verificadas. Segundo Toprac e Cooke (1959), é usual existirem vigas alveoladas com razões de expansão entre 30% a 70%.

## 2.2 Composição e Resistência Mecânica

As vigas alveoladas podem ser simplesmente de aço ou mistas aço-betão (ver Figura 3). Uma viga alveolada de aço é aquela que utiliza apenas o material de que é composta, ou seja, o aço, para resistir aos esforços atuantes. Uma viga alveolada mista é constituída pela viga alveolada de aço e pela laje de betão; estes dois elementos são ligados por meio de conectores de corte colocados ao longo da viga, possibilitando um funcionamento conjunto do aço e do betão para resistir aos esforços atuantes. Consequentemente, nestas vigas mistas a resistência mecânica e a rigidez à flexão são em geral consideravelmente maiores do que em vigas alveoladas de aço (Rodrigues, 2007).



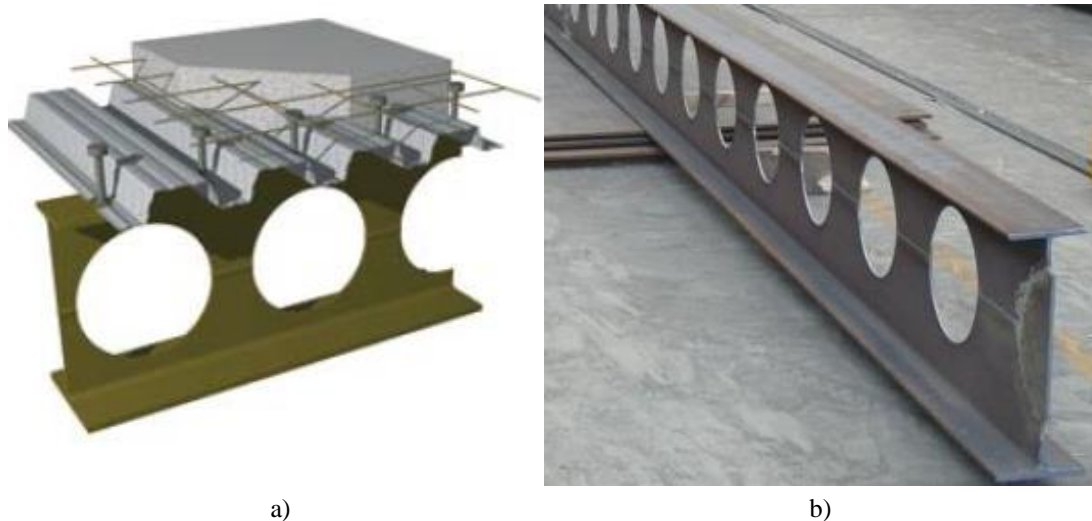


Figura 3 - Vigas alveoladas: a) Mista; b) Aço (ArcelorMittal, 2011; GraySon, 2012)

## 2.3 Processo de Fabrico

As vigas alveoladas podem ser executadas através de diversos processos. O primeiro consiste na realização de aberturas feitas diretamente na alma de um perfil laminado. Neste processo, executam-se aberturas isoladas, ou seja, sem formação de T's, mantendo-se a altura do perfil metálico original. Assim, este sofre uma redução local da área e diminuição da sua capacidade resistente.

O segundo processo corresponde à formação de duas secções em T. O perfil de aço original é cortado e ressoldado de forma desfasada, sendo os furos obtidos a partir da soldadura da parte da alma de cada T adjacente. Assim, a altura do perfil metálico resultante pode sofrer um incremento de até 75% em relação à altura do perfil metálico original, o que implica um aumento significativo do momento de inércia e logo da resistência e rigidez de flexão.

O terceiro processo baseia-se na união de três chapas de aço. Desta forma, os banzos e a alma são soldados, formando um perfil soldado em I ou H. As aberturas na alma deste novo perfil alveolado podem ser obtidas antes do processo de soldadura ou após o mesmo, podendo estas aberturas ser regularmente espaçadas ou isoladas. Uma das vantagens deste processo é que, durante a soldadura, existe a possibilidade de definir chapas metálicas com diferentes diâmetros, curvaturas, espaçamentos e formas, permitindo por exemplo o fabrico de vigas alveoladas assimétricas ou de inércia variável (ver Figura 4) (Rodrigues, 2007; Lawson e Hicks, 2011; Oliveira, 2011).



Figura 4 - Vigas alveoladas de inércia variável com banzo e alma soldados (Bruning Tecnometal, 2007)

Todo o processo de soldadura deve ser executado com controlo de qualidade rigoroso, de modo a garantir que a secção não perca resistência devido a falhas na soldadura, procurando manter, no mínimo, a resistência do material original do perfil. Para esta finalidade, pode utilizar-se qualquer dos processos conhecidos de soldadura (Darwin, 1990).

O uso de tochas de plasma automatizadas e controladas por computador permite grande variedade de aberturas e uma maior economia na produção de vigas alveoladas de alta precisão. No caso das vigas alveoladas celulares (ver Figura 5), o corte em elipse minimiza a perda de material; posteriormente as duas metades são separadas, desfasadas e soldadas em conjunto (Bradley, 2003).

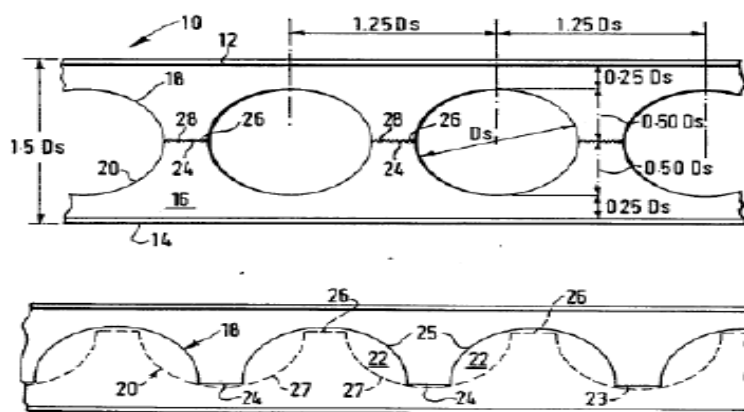


Figura 5 - Processo de produção de vigas celulares com aberturas circulares (Gerdau Açominas, 2011)

Em comparação com outras vigas alveoladas, as vigas celulares constituem uma solução económica devido à sua geometria flexível, pois o diâmetro e o espaçamento das aberturas são ajustáveis (ArcelorMittal, 2011).

## **2.4 Vantagens, Desvantagens e Aplicação das Vigas Alveoladas**

De acordo com Darwin (1999), em geral as vantagens destas vigas são maiores que as suas limitações, justificando assim o crescente interesse da comunidade científica e tecnológica pela evolução dos métodos de fabrico e pelo conhecimento do desempenho destas vigas. Em seguida, listam-se as principais vantagens e inconvenientes desta solução estrutural.

### **2.4.1 Vantagens**

Segundo Andrade (2010), relativamente a uma viga de alma cheia, uma viga alveolada possui maior resistência e menores deformações, e mais leve em relação ao perfil original. Assim, com a mesma quantidade de material, podem ser vencidos vãos de maiores dimensões com segurança. Com a redução do peso da estrutura, também se reduzem as cargas verticais, permitindo diminuição do número de pilares e maior economia nos elementos da superestrutura e da fundação. Contudo, deve considerar-se também na contabilização do custo final da estrutura o impacto do custo de fabrico das vigas alveoladas, já que o mesmo envolve operações de corte e soldadura, que acarretam maior tempo para fabricação e maior necessidade de controlo de qualidade.

Atualmente, existe tendência para se utilizarem condutas e dutos de ar condicionado de grandes diâmetros, cuja abertura na alma das vigas de aço pode atingir 75% da altura da viga. A presença de grandes aberturas na alma das vigas de aço pode penalizar seriamente a capacidade de resistente das vigas alveoladas, a qual obviamente depende da forma, do tamanho e da localização dessas aberturas (Chung e Lawson, 2001). Outro aspeto interessante para o uso de vigas alveoladas é o aumento do número de edificações que exigem a acomodação de um número cada vez maior de instalações técnicas, tais como: sistemas elétrico, hidráulico, sanitário, ar condicionado, segurança e automação. Exemplos de edifícios que normalmente requerem um número elevado de instalações são: hospitais, laboratórios e escritórios. Outra situação onde há necessidade de grandes vãos, de uma maior presença da luz natural e de dutos de água é caso de parques automóveis (Oliveira, 2011). Para estes cenários, as vigas alveoladas constituem naturalmente uma solução estrutural atrativa (ver Figura 6).

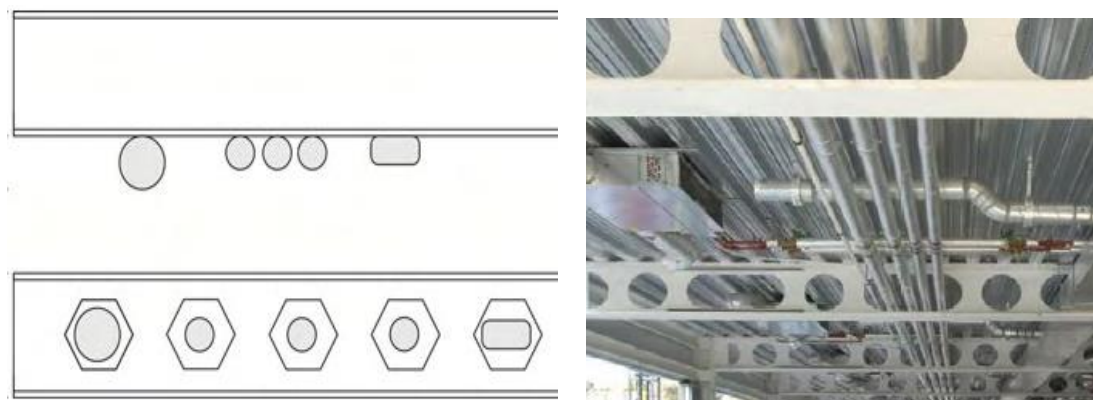


Figura 6 - Passagem de instalações em vigas alveoladas (Oliveira, 2011; Westok, 2008)

Apesar de as vigas alveoladas serem uma escolha adequada para muitas situações, é errado afirmar que são a melhor solução para qualquer caso. Existem algumas situações em que as cargas são muito pequenas, os vãos muito curtos ou as limitações de profundidade demasiado restritivas para poder usufruir da economia proporcionada pelas vigas alveoladas. No entanto, a eficiência e a funcionalidade das vigas alveoladas têm sido amplamente estabelecidas, nomeadamente para vãos relativamente elevados e sujeitos a cargas médias ou pesadas, onde o seu uso merece consideração (Paiva, 2009).

#### 2.4.2 Desvantagens

Devido às aberturas na alma, o comportamento estrutural destas vigas é diferente do comportamento das vigas de alma cheia. Assim, existem diferentes modos de rotura e possibilidades de colapso, os quais devem ser analisados tendo em atenção as particularidades destas vigas e tendo presente que os métodos tradicionais de análise não são suficientes para proceder adequadamente ao seu dimensionamento. A baixa capacidade resistente destas vigas a cargas concentradas é outro fator que deve ser levado em consideração e que por vezes condiciona a sua aplicação (Gholizadeh *et al.*, 2011).

#### 2.4.3 Campos de Aplicação

As vigas alveoladas possibilitam vencer grandes vãos (até aproximadamente 40 m), oferecem aos arquitetos e engenheiros vastas possibilidades para conceitos criativos e favorecem a conceção de sistemas estruturais que tiram partido da sua estética, tanto para composição de fachadas como para disposição de espaços exteriores e interiores (ver Figura 7).

Para sistemas de grandes coberturas, as vigas alveoladas são muitas vezes vantajosas em relação às treliças, pois são constituídas por menos peças. Consequentemente, os preços dos

trabalhos e do transporte e montagem são reduzidos (ArcelorMittal, 2011). Além de coberturas, as vigas alveoladas podem ser utilizadas em estruturas mistas, pontes, composição de fachadas e reabilitação de edifícios (Luiza Oliveira, 2012).



a)

b)

Figura 7 - a) Vigas alveoladas de dupla curvatura; b) Aplicação de vigas alveoladas no Estádio Cidade de Coimbra (Westok, 2012; Abecassis, 2011)

## 2.5 Modos de Rotura

### 2.5.1 Considerações Gerais

A presença de aberturas na alma, para além de alterar os modos de rotura observados em vigas de alma cheia, possibilita também o aparecimento de novos modos de rotura (Kerdal e Nethercot, 1984). Os modos adicionais de colapso das vigas alveoladas estão associados à esbelteza e espessura da alma, geometria do corte e tipo de carregamento aplicado. Os modos de rotura seguidamente apresentados e classificados (ver Figura 8) têm em conta a tipologia das cargas, ou seja, se as cargas são distribuídas ou concentradas, admitindo vigas alveoladas de aço ou mistas com uma ou várias aberturas.

Os modos de rotura a considerar são, segundo Chung (2001) e Hoffman (2006):

- i. Mecanismo de Flexão;
- ii. Encurvadura Lateral por Flexão-Torção;
- iii. Mecanismo de Vierendeel / Rotura por Esforço Transverso;
- iv. Rotura por Esforço de Corte Longitudinal;
- v. Encurvadura da Alma por Corte;

vi. Encurvadura da Alma por Compressão.

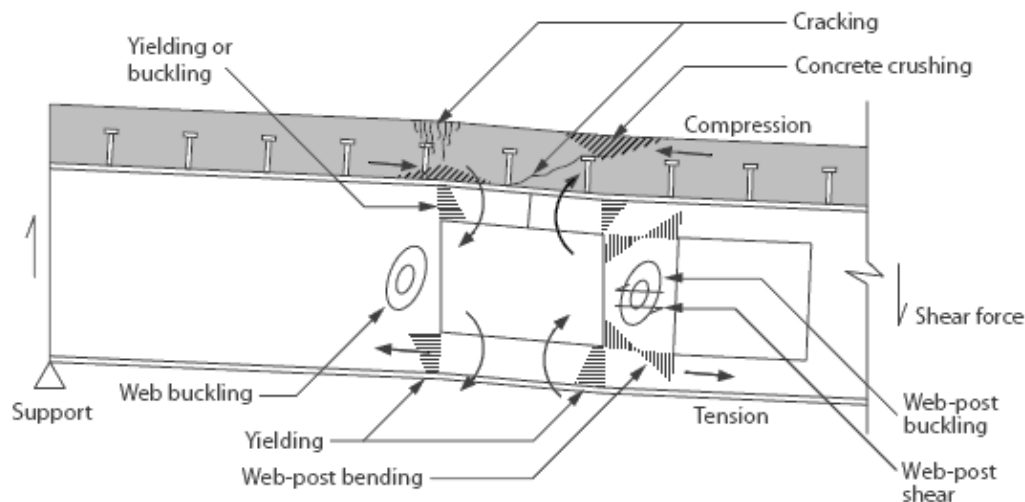


Figura 8 - Modos de colapso em vigas alveoladas (Lawson e Hicks 2011)

### 2.5.2 Mecanismo de Flexão

De acordo com Demirdjian (1999), em secções de Classe 1 ou 2, as vigas alveoladas simplesmente apoiadas atingem a carga máxima pela plastificação nas secções em T, submetidas a esforços de compressão e tração, respetivamente. Toprac e Cooke (1959) apresentaram casos de vigas alveoladas que sofreram colapso por formação de mecanismos de flexão.

### 2.5.3 Encurvadura Lateral por Flexão-Torção

A encurvadura lateral com torção é um estado limite último causada pelo momento fletor que pode ocorrer tanto em vigas de alma cheia como em vigas alveoladas. Nos perfis em I, este fenómeno pode ser explicado pelo fato da parte comprimida da seção transversal se tornar instável, mas, por estar ligada continuamente por meio da alma à parte tracionada, o efeito estabilizador desta parte faz com que a ocorrência de encurvadura corresponda a uma translação lateral  $\mu(z)$  associada a uma torção  $\phi(z)$ , como ilustrado na Figura 9 (Bezerra, 2011).



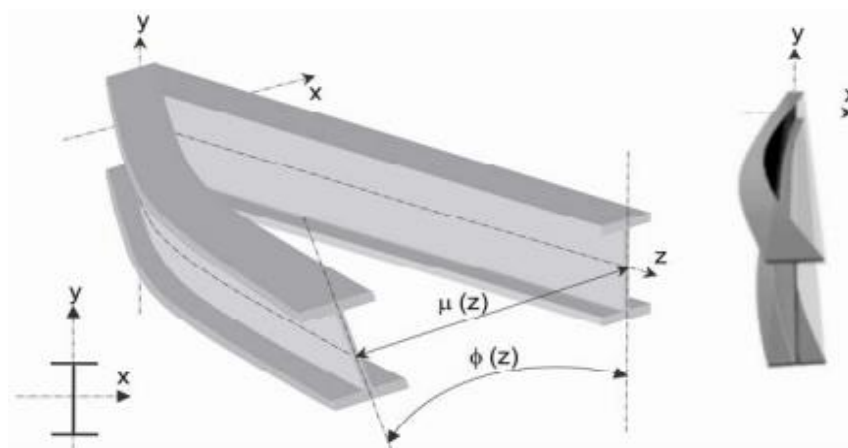


Figura 9 - Encurvadura lateral com torção (Ahmed, 2004; Bezerra, 2011)

O momento fletor resistente à encurvadura lateral com torção depende essencialmente do comprimento de encurvadura e das condições de apoio ao longo da viga. Assim, quantos mais deslocamentos forem impedidos, maior será a capacidade resistente da viga. Este fenómeno é mais provável de acontecer em vigas metálicas do que em vigas mistas, visto que estas possuem, para vãos simplesmente apoiados, contraventamento lateral contínuo no banzo comprimido, conferido pela laje de betão (Sabarish e Biju, 2010).

#### 2.5.4 Mecanismo de Vierendeel

O mecanismo de Vierendeel ocorre devido à presença de elevados valores de esforço transversal na viga. Um esforço transversal elevado produz momentos flectores locais adicionais, surgindo rótulas plásticas nos cantos das aberturas (ver Figura 10). Os alvéolos sofrem distorção em forma de um paralelograma. Este modo de rotura é observado principalmente para algumas combinações de vãos curtos com aberturas alongadas, grande distância entre aberturas e baixa altura (relativamente à altura expandida do perfil) das secções em T formadas acima e abaixo das aberturas. A rotura pode surgir na abertura onde o maior esforço transversal atuar ou, se mais aberturas estiverem sujeitas à mesma força, será a abertura sujeita ao maior momento aquela que entrará em rotura (Kerdal e Nethercot, 1984).

As vigas de aço são menos robustas em relação às vigas mistas, visto que a área comprimida pelos momentos flectores locais restringe-se ao banzo superior e ao T superior. A transferência de esforço transversal pela web-post, ou seja, pela zona da alma entre as aberturas, pode ter como consequência a sua rotura por encurvadura devido ao esforço transversal (Lawson e Hicks, 2011; Wong, 2010).

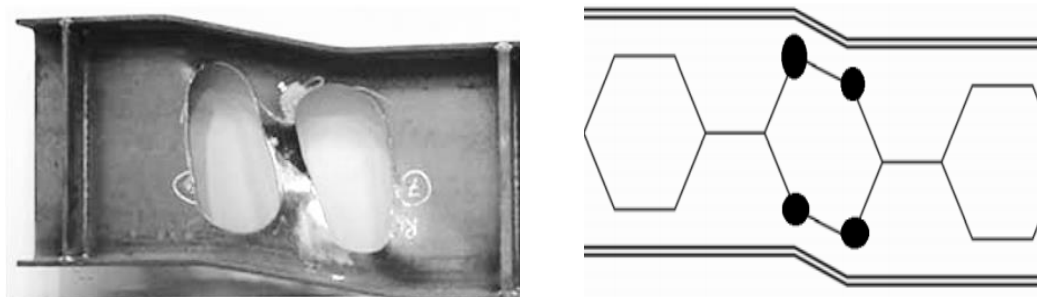


Figura 10 - Mecanismo de Vierendeel (Veríssimo, 1996; Tsavdaridis e D'mello, 2011)

### 2.5.5 Esforço de Corte Longitudinal

A rotura da soldadura na junção das duas partes do perfil pode ocorrer devido à presença de esforço de corte horizontal no eixo longitudinal entre aberturas, levando à separação da secção entre aberturas. Normalmente este modo de colapso ocorre em vigas com aberturas grandes e comprimento de soldadura pequeno, e em alguns casos é observada apenas uma deformação excessiva na periferia da junta de soldadura, antes de ocorrer a rotura propriamente dita, como se observa na Figura 11 (Toprac e Cooke 1959).

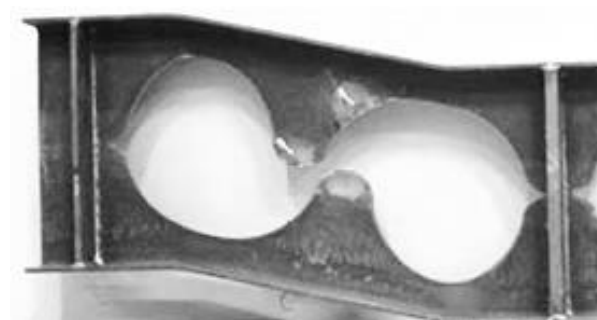


Figura 11 - Rotura da junta de soldadura entre aberturas (Tsavdaridis e D'mello, 2011)

### 2.5.6 Encurvadura da Alma por Esforço Transverso

Uma força de corte horizontal,  $F$ , atuando ao longo da junta de soldadura produz momento no montante da alma, que é equilibrado por uma força de corte  $V/2$ , conforme mostra a Figura 12. Assim, a face AB fica tracionada e a face CD comprimida, podendo esta última encurvar. Essa encurvadura é caracterizada por uma rotação em torno do eixo  $xx'$ .



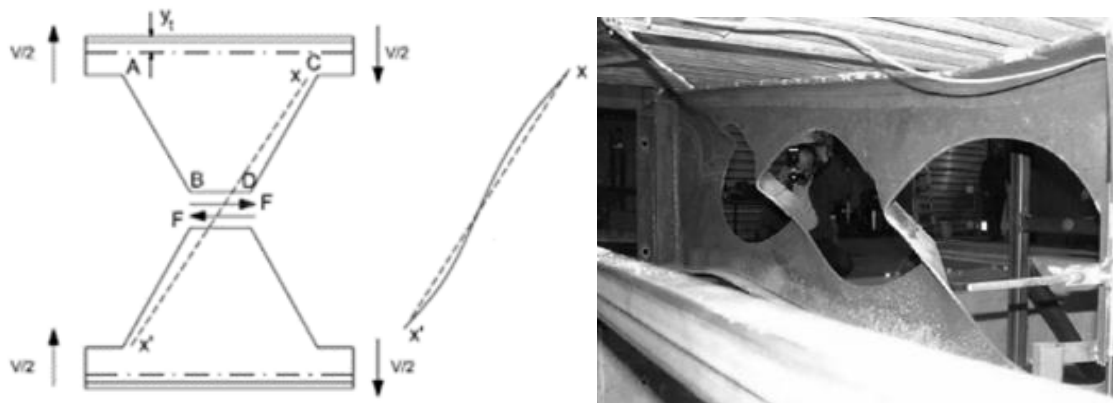


Figura 12 - Encurvadura da alma por corte (Kerdal e Nethercot, 1984; Nadjai et al., 2008)

Estudos experimentais de Zaarour e Redwood (1996), concluíram que este tipo de rotura está associado a várias características geométricas, nomeadamente a relação entre altura da abertura e altura total da secção, e entre altura da abertura e espessura da alma. A encurvadura da alma tem um papel preponderante no que toca ao dimensionamento de vigas alveoladas, em especial para vigas com múltiplas aberturas na alma, onde a encurvadura da alma pode ser condicionante, principalmente quando o espaçamento entre aberturas é pequeno (Lawson e Hicks, 2011).

### 2.5.7 Encurvadura da Alma por Compressão

Este modo de rotura é semelhante ao enrugamento da alma que se observa numa viga de alma cheia submetida a cargas concentradas, podendo-se localizar tanto no vão da viga, como nos apoios. Ao contrário do que ocorre na encurvadura da alma por corte, o deslocamento lateral não é acompanhado de torção (Kerdal e Nethercot, 1984).

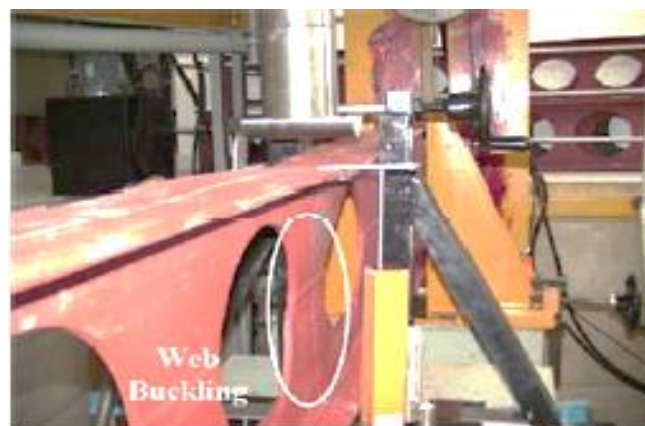


Figura 13 - Encurvadura da alma por compressão (Erdal, 2012)



## **3. Dimensionamento aos Estados Limite Últimos e de Utilização**

### **3.1 Enquadramento Normativo**

Neste capítulo é apresentada a metodologia de avaliação da segurança aos Estados Limite Últimos (ELU) e de Utilização (ELUt), para vigas metálicas e mistas alveoladas, segundo a norma de dimensionamento do Steel Construction Institute – SCI-P355: Design of composite beams with large web openings (Lawson e Hicks, 2011). Esta norma obedece às normas EN 1993-1-1, ENV 1993-1-1 Annex N e EN 1994-1-1. É ainda realizada uma comparação com uma proposta de dimensionamento de vigas mistas alveoladas (Large web openings for service integration in composite floors: Eurocode design method for composite and non-composite beams with web openings, European Commission, 2006) que está de momento a ser analisada pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), com a finalidade de ser integrada na norma EN 1994 -1-1, anexo N, para lajes mistas.

### **3.2 Generalidades**

Segundo Lawson e Hicks (2011), não é possível estabelecer um guia de dimensionamento de vigas alveoladas detalhado para todos os casos possíveis, embora os princípios gerais de dimensionamento estrutural devam ser sempre observados, particularmente para perfis soldados. Outros métodos de cálculo de vigas alveoladas simplesmente apoiadas, sujeitas a momento fletor positivo, abrangem também o seu dimensionamento para diversas situações, tais como: reforços verticais e horizontais para melhorar a resistência ao esforço transversal

e/ou momento fletor na viga, parâmetros geométricos das aberturas e introdução de carregamento através de vigas secundárias.

Os procedimentos de cálculo definidos na norma de dimensionamento SCI-P355 incluem a verificação aos estados limite últimos e aos estados limite de utilização, definidos para vigas metálicas ou mistas alveoladas simplesmente apoiadas em eixo retilíneo com cargas uniformemente distribuídas ou concentradas. Estas vigas alveoladas podem ser constituídas a partir de perfis laminados a quente ou chapas soldadas, com banzos de Classe 1, 2, ou 3 e com almas de Classe 1, 2, 3 ou 4, cujas aberturas podem ser retangulares, circulares, circulares alongadas ou excêntricas em relação à altura da alma, mas com espessura constante na alma. Nas vigas alveoladas mistas, a laje de betão é geralmente maciça e a respetiva cofragem é assegurada por chapas perfiladas, sendo pois autoportante e definitiva. As nervuras da chapa perfilada são preferencialmente orientadas segundo o menor vão, ou seja, essa chapa assenta perpendicularmente à orientação da viga alveolada. De um modo conservativo, embora se tenha em conta a capacidade resistente à compressão da laje a resistência à compressão do T superior quando sujeito a flexão é ignorada, diminuindo assim o momento fletor e o esforço transversal resistente de Vierendeel (Lawson e Hicks, 2011).

Os Estados Limite Últimos (ELU) a considerar são:

- Momento Fletor;
- Esforço Transverso;
- Mecanismo de Vierendeel;
- Esforço de Corte Longitudinal;
- Encurvadura por Esforço Transverso;
- Encurvadura por Compressão;
- Encurvadura Lateral;
- Faseamento Construtivo.

Os Estados Limite de Utilização (ELUt) a considerar são:

- Deformação;
- Fendilhação do Betão;
- Vibração.

### 3.2.1 Viga de Vierendeel

Delesques (1969) desenvolveu um procedimento para verificação da capacidade resistente de vigas castelares, com algumas simplificações. Dentro dessas simplificações, destaca-se a analogia do comportamento das vigas alveoladas ao comportamento de uma viga Vierendeel com rótulas a meia altura nos montantes e entre os banzos (ver Figura 14). Deste modo, a análise pode ser feita de modo análogo ao de uma treliça hipostática do 1º grau, em que os nós coincidem com as secções onde se admite momento nulo (Veríssimo et al., 2013).

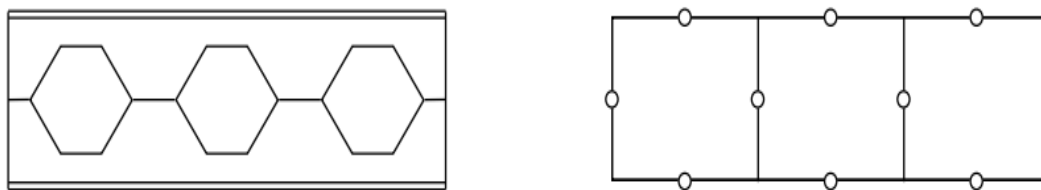


Figura 14 - Analogia da viga alveolada com viga Vierendeel (Veríssimo et al., 2013)

### 3.2.2 Simplificações do Modelo de Dimensionamento

A distribuição de forças internas em torno de uma abertura de uma viga é muito complexa e, por conseguinte, diversas hipóteses simplificativas têm de ser feitas para aplicações práticas de acordo com Lawson e Hicks, 2011:

- Para uma carga concentrada, o esforço transversal é constante ao longo do comprimento da abertura;
- Por equilíbrio com o cálculo da força de tração no T inferior, a força de compressão na laje pode ser estabelecida com base no número de conectores colocados até ao eixo da abertura;
- Os momentos resistentes plásticos ou elásticos do T entre aberturas dependem da classificação da secção e são reduzidos por motivo da existência de esforço transversal e/ou axial;
- O esforço transversal que atua sobre a abertura é resistido principalmente pelo T superior, enquanto o T inferior resiste à tração devida ao momento fletor, é conservativo admitir que todo o esforço transversal é resistido pelo T superior e pela laje de betão;
- O modelo de encurvadura entre aberturas depende do esforço de corte longitudinal e do momento fletor entre aberturas, o qual é aumentado se existir excentricidade do centro geométrico das aberturas em relação ao centro geométrico da viga.

### 3.2.3 Pré-dimensionamento Geométrico

O modelo de dimensionamento é definido para vigas alveoladas com aberturas retangulares. Para aberturas circulares e circulares alongadas é usada uma abertura retangular equivalente, onde a altura e a posição vertical na alma são idênticas, mas o comprimento efetivo é diferente para o momento fletor de Vierendeel e encurvadura da alma.

#### 3.2.3.1 Parâmetros Geométricos

Na Figura 15 são indicados os parâmetros geométricos necessários ao dimensionamento de vigas alveoladas, com aberturas retangulares e circulares.

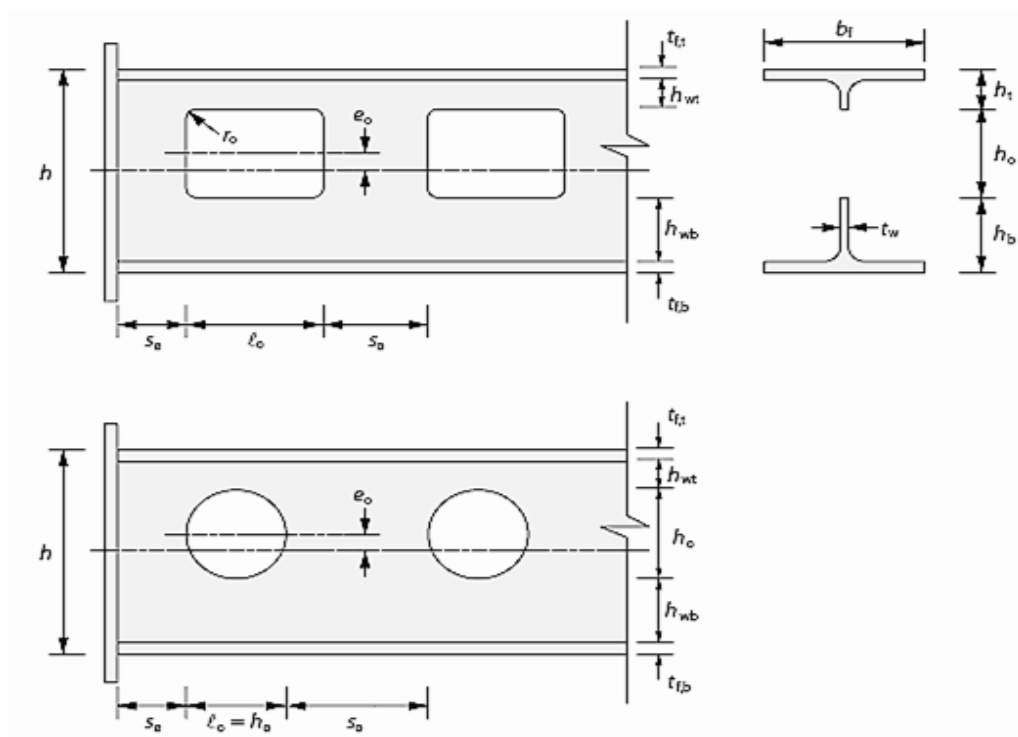


Figura 15 - Parâmetros geométricos de vigas alveoladas (Lawson e Hicks, 2011)

#### 3.2.3.2 Limites Geométricos

Os limites dos parâmetros geométricos dados no Quadro 1 podem ser usados normalmente em vigas alveoladas e alveoladas mistas. Aberturas que excedam esses limites podem ainda ser adotadas, desde que o seu dimensionamento seja justificado por cálculos adequados.

Na fase de projeto inicial, a equação seguinte permite determinar uma aproximação do momento fletor resistente numa viga alveolada:

$$M_{0,Rd} = M_{Rd} \left( 1 - \frac{0,35h_o}{h} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

$M_{Rd}$  - momento fletor resistente da viga de alma cheia correspondente;

$M_{0,Rd}$  - momento fletor resistente da viga alveolada;

$h_o$  - altura das aberturas da viga alveolada;

$h$  - altura da viga alveolada.

Quadro 1-Limites dimensionais para vigas alveoladas (Lawson e Hicks, 2011; ENV 1993-1-1 Annex N, 1998)

| Parâmetros geométricos da viga alveolada                      | Tipo de abertura                  |  |
|---|-----------------------------------|--|
|   | Circular                          | Retangular   |
| Altura da abertura  | $d_o \leq 0,8 h$                  | $h_o \leq 0,7 h$   |
| Altura da secção em T   | $h_T \geq t_f + 30 \text{ mm}$    | $h_T \leq 0,1 h$   |
| Razão entre as secções em T                                   | $0,5 \leq \frac{h_b}{h_t} \leq 3$ | $1 \leq \frac{h_b}{h_t} \leq 2$  |
| Comprimento da abertura                                       | -----                             | $l_o \leq 2 h_o$   |
| Distância entre aberturas                                     | $s_o \geq 0,3 d_o$                | $s_o \geq 0,5 l_o$   |
| Distância da extremidade da viga metálica à primeira abertura | $s_e \geq 0,5 d_o$                | $s_e \geq l_o$   |
| Raio do canto da abertura                                     | -----                             | $r_o = \min \left\{ \begin{matrix} 2t_w \\ 15\text{mm} \end{matrix} \right.$ |

### 3.3 Combinação de Ações

No dimensionamento, devem ser considerados vários tipos de ações bem como a sua combinação, tanto para os estados limite últimos (ELU) como para os estados limite de utilização (ELUt), de acordo com as normas EN 1990 e EN 1991.

### 3.3.1 Estados Limite Últimos

Para análise aos estados limite últimos, são considerados dois tipos de ações, as ações de projeto persistentes e transitórias. A combinação fundamental de ações, de acordo com a NP EN 1990, obedece à seguinte equação:

$$E_d = \sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,1} \quad (3.2)$$

Carga Permanente
Pré-Esforço
Ação Variável de Base
Outras ações Variáveis

### 3.3.2 Estados Limite de Utilização

Um estado limite de utilização é um estado que, pela sua ocorrência, repetição e duração causa efeitos estruturais que não respeitam as condições para uso normal da estrutura. Existem três combinações possíveis de ações a considerar, a combinação característica para estados limites irreversíveis, a combinação frequente para estados limites reversíveis e a combinação quase-permanente para efeitos a longo prazo. Os correspondentes valores recomendados dos coeficientes  $\gamma$  e  $\psi$  a utilizar na equação 3.2 encontram-se estipulados no Anexo A1 da NP EN 1991.

## 3.4 Materiais

### 3.4.1 Aço

Segundo o disposto na EN 1993-1-1, a resistência do aço é normalmente expressa em termos das suas tensão de cedência e tensão de rotura em *MPa*. Vários tipos de aço podem ser utilizados em vigas alveoladas, sendo os mais comuns o S235, o S275 e o S355. No Quadro 2, indicam-se as tensões de cedência e as tensões últimas destes aços.



Quadro 2-Tensão de cedência e tensão última de aços (EN 100025-2, 2010)

| Classe do Aço | Espessura nominal do elemento |                     |   |                     |
|---------------|-------------------------------|---------------------|---|---------------------|
|               | $t \leq 16 \text{ mm}$        |                     | $16 \text{ mm} \leq t \leq 40 \text{ mm}$ |                     |
|               | $f_y \text{ (MPa)}$           | $f_u \text{ (MPa)}$ | $f_y \text{ (MPa)}$                       | $f_u \text{ (MPa)}$ |
| S235          | 235                           | 360                 | 225                                       | 360                 |
| S275          | 275                           | 430                 | 265                                       | 410                 |
| S355          | 355                           | 510                 | 345                                       | 470                 |

De acordo com a EN 1994-1-1, as chapas perfiladas para lajes mistas podem variar de forma, profundidade, espaçamento e espessura. Estas chapas de aço têm normalmente espessura mínima comercial entre 0,7 e 1,5 mm, tensão de cedência de 280 MPa e tensão de rotura de 360 MPa.

### 3.4.2 Betão

O valor característico da resistência à compressão do betão,  $f_{ck}$ , obtido através do ensaio de provetes cilíndricos aos 28 dias de idade, define a classe de resistência do betão. Por exemplo, um betão da classe C30/37 possui resistência característica de 30 MPa para provetes cilíndricos e 37 MPa para provetes cúbicos. Segundo a EN 1992-1-1, a relação de resistências entre provetes cilíndricos e cúbicos é dada pela seguinte equação:

$$f_{ck} \simeq 0,8 f_{ck,cube} \quad (3.3)$$

No Quadro 3, indicam-se as resistências características e módulos de elasticidade das diferentes classes de betão.

Quadro 3-Resistências características e módulo de elasticidade de cada classe de betão (EN 1992-1-1, 2010)

| Propriedades do Betão       | Classe do Betão |        |        |        |        |
|-----------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
|                             | C20/25          | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C40/50 |
| $f_{ck} \text{ (MPa)}$      | 20              | 25     | 30     | 35     | 40     |
| $f_{ck,cube} \text{ (MPa)}$ | 25              | 30     | 37     | 45     | 50     |
| $E_{cm} \text{ (GPa)}$      | 30              | 31     | 33     | 34     | 35     |

Segundo a EN 1994-1-1, admite-se que a secção efetiva de betão comprimido resiste a uma tensão de  $0,85f_{cd}$  ( $f_{cd} = f_{ck}/1,5$ ), constante em toda a área compreendida entre o eixo neutro e a fibra mais comprimida do betão.

### 3.5 Viga Alveolada Mista

O comportamento global de um elemento misto depende fundamentalmente da conexão de corte entre o aço e o betão. A variação do momento fletor ao longo das peças (devida à existência de esforço transversal) origina esforços de escorregamento nas superfícies de contacto entre o aço e o betão, que, se não forem resistidos, condicionam seriamente o comportamento conjunto dos dois materiais (Guimarães, 2009).

#### 3.5.1 Conectores de Corte

A aderência natural e o atrito entre o betão e o aço da viga alveolada não são geralmente tidos em consideração no cálculo da conexão entre estes materiais. Assim, é necessária a utilização de conectores para resistir a esforços de corte, impedindo o deslizamento relativo e a separação entre a viga alveolada e a laje de betão. Os conectores do tipo perno com cabeça são classificados como flexíveis por assegurarem um comportamento dúctil na ligação aço/betão. Este comportamento caracteriza-se pela possibilidade do conector continuar a deformar-se após atingir a sua resistência máxima sem que ocorra uma rotura abrupta, proporcionando aos conectores vizinhos a absorção das forças de corte longitudinais atuantes, num procedimento de uniformização da resistência da conexão no comprimento crítico (Guimarães, 2009).

Segundo a EN 1994-1-1, a resistência ao esforço de corte longitudinal dos conectores,  $P_{Rd}$ , é dada pelo valor mínimo entre:

$$P_{Rd} = \frac{0,8 f_u \pi d^2}{4 \gamma_v} \quad (3.4)$$

e

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_v} \quad (3.5)$$

com,

$$\alpha = 0,2 \left( \frac{h_{sc}}{d} + 1 \right) \text{ para } 3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4 \quad (3.6)$$

$$\alpha = 1 \text{ para } \frac{h_{sc}}{d} > 4 \quad (3.7)$$

Onde:

$d$  - diâmetro do pino do conector ( $16\text{mm} \leq d \leq 25\text{mm}$ );

$h_{sc}$  - altura nominal do conector;

$f_u$  - tensão última do aço do conector;

$f_{ck}$  - resistência à compressão característica do betão;

$E_{cm}$  - módulo de elasticidade do betão;

$\gamma_v$  - coeficiente parcial de segurança à conexão;

$k_t$  - fator de redução para nervuras perpendiculares ao eixo da viga.

O uso de lajes mistas com chapa perfilada obriga a uma redução da resistência dos conectores de corte. O fator de redução  $k_t$  depende da geometria e da orientação das nervuras existentes na chapa perfilada, assim como do número de conectores aplicados por nervura (Lawson e Hicks, 2011). Este fator é dado na EN 1994-1-1 em nervuras perpendiculares à viga, por:

$$k_t = \frac{0,7 b_o}{\sqrt{n_r} h_p} \left( \frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \leq k_{t,max} \quad (3.8)$$

Onde:

$b_o$  - valor médio da largura das nervuras da chapa perfilada;

$n_r$  - número de conectores em cada nervura;

$h_p$  - altura da chapa perfilada;

$k_{t,max}$  - valor máximo admissível de  $k_t$  (ver Quadro 4).

Quadro 4 - Valores máximos admissíveis de  $K_t$  (SCI-P355, 2011)

| Número de conectores de corte por nervura | Espessura da chapa perfilada (mm) | Conectores soldados através da chapa perfilada e com diâmetro inferior a 20 mm | Chapa perfilada perfurada e conectores com diâmetro entre 19 mm a 22 mm |
|---|-----------------------------------|--|---|
| $n_r = 1$                                 | $\leq 1$                          | 0,85   | 0,75  |
|   | $> 1$                             | 1,00   | 0,75  |
| $n_r = 2$                                 | $\leq 1$                          | 0,70   | 0,60  |
|   | $> 1$                             | 0,80   | 0,60  |

Devem ser ainda ser respeitadas diversas disposições construtivas relativas ao espaçamento, recobrimento e dimensões dos conectores, presentes na EN 1994-1-1.

### 3.5.2 Largura Efetiva da Laje de Betão

O sistema estrutural de um pavimento misto consiste essencialmente numa série de vigas em “T” paralelas. A contribuição do banzo de betão sujeito a compressão e flexão é limitada pela influência do efeito “shear lag”. Assim, a distribuição das tensões longitudinais na laje não é uniforme ao longo da secção transversal, pelo que não se deve considerar que a largura total da laje contribui para a resistência da secção mista. Para simular este efeito, a largura da laje é reduzida, de modo a que as tensões possam ser assumidas como uniformes nessa largura (Catai, 2006).

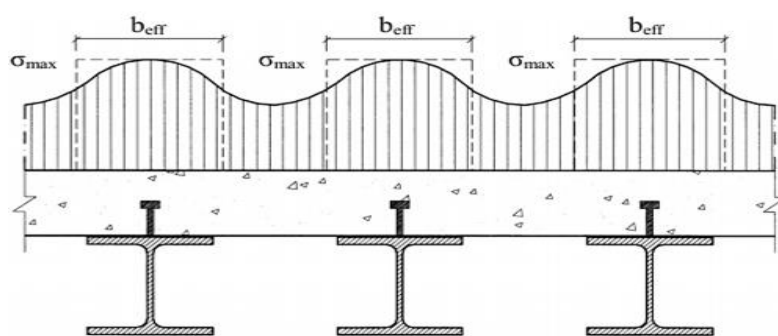


Figura 16 - Variação de tensões longitudinais ao longo da secção transversal (Calado e Santos, 2010)

As tensões longitudinais máximas localizam-se junto aos conectores de corte e diminuem na região entre as vigas metálicas. Igualando a área do diagrama de tensões real à área de um diagrama retangular de altura igual ao valor da tensão máxima registada, obtém-se a largura efetiva da laje sujeita a uma tensão máxima uniforme (Costa, 2008). A largura efetiva em vigas mistas é definida de acordo com a EN 1994-1-1, existindo uma distinção entre secções em apoios interiores ou a meio vão e secções em apoios de extremidade. A norma SCI-P355 estabelece de forma simplificada a largura efetiva da laje em que é dispensada a distância transversal entre os eixos dos conectores de corte.

A largura efetiva da laje de betão na região de uma abertura da viga alveolada é definida na norma SCI-P355 por:

$$b_{eff,o} = \frac{3L_e}{16} + \frac{x}{4} \text{ para } x \leq \frac{L_e}{4} \quad (3.9)$$

e

$$b_{eff,o} = \frac{L_e}{4} \text{ para } x > \frac{L_e}{4} \quad (3.10)$$

Onde:

$x$  - distância do centro da abertura á extremidade da viga apoiada;

$L_e$  - comprimento do vão equivalente, caso a viga seja simplesmente apoiada, o vão equivalente coincide com o vão da viga.

### 3.5.3 Conexão de Corte

O grau de conexão de corte está associado à capacidade resistente da viga alveolada para desenvolver o seu momento fletor plástico sem que ocorra a rotura da ligação. Na norma EN 1994-1-1, afirma-se que só é possível admitir conexão parcial para um comportamento plástico da viga mista, ou seja, quando as secções transversais da viga forem de Classe 1 ou 2. Saliente-se que na cláusula 6.2.1.3 dessa norma é referido que a conexão parcial só é permitida em zonas de momento fletor positivo máximo.

De acordo com a EN 1994-1-1, o grau de conexão de corte,  $\eta$ , é definido por:

$$\eta = \frac{n}{n_f} \quad (3.11)$$

Onde:

$n_f$  - número de conectores necessários para garantir a conexão total;

$n$  - número de conectores aplicados entre o apoio e a secção de momento fletor máximo.

No caso de a capacidade resistente do perfil de aço à tração ser superior à capacidade resistente de compressão da laje de betão ( $N_{a,Rd} > N_{c,s,Rd}$ ), o grau de conexão parcial calcula-se da seguinte forma:

$$\eta = \frac{N_{c,max}}{N_{c,s,Rd}} \quad (3.12)$$

Onde:

$N_{c,max}$  - força total de corte longitudinal transferida pelos conectores,  $N_{c,max} = n \cdot P_{Rd}$ ;

$N_{c,s,Rd}$  - resistência à compressão da laje de betão na largura efetiva,  $N_{c,s,Rd} =$

$$0,85 f_{cd} b_{eff} h_c;$$

$h_c$  - altura da laje de betão;

$N_{a,Rd}$  - esforço axial resistente da viga alveolada.

Alternativamente, se a capacidade resistente do perfil de aço à tração for inferior à capacidade de compressão da laje de betão ( $N_{c,s,Rd} < N_{a,Rd}$ ), o grau de conexão parcial pode ser calculado através de:

$$\eta = \frac{n \cdot P_{Rd}}{N_{a,Rd}} \quad (3.13)$$

### 3.5.3.1 Grau Mínimo de Conexão de Corte

Um grau mínimo de conexão de corte é estabelecido para garantir comportamento plástico na deformação dos conectores. Esse grau é calculado de acordo com a cláusula 6.6.1.2 da norma EN 1994-1-1. Assim, para um perfil de aço simétrico sujeito a momento positivo:

$$L_e \leq 25 : \eta \geq 1 - \left( \frac{355}{f_y} \right) (0,75 - 0,03L_e), \text{ com o mínimo de } \eta \geq 0,4 \quad (3.14)$$

$$L_e > 25 : \eta \geq 1,0 \quad (3.15)$$

Em que  $L_e$  representa o comprimento do vão equivalente da viga em metros.

De acordo com a SCI-P355, na aplicação de cargas, nomeadamente nas pontuais próximas das extremidades, deve-se garantir uma boa conexão entre a viga e a laje de betão nas aberturas próximas das extremidades. A seguinte equação mostra que o esforço de compressão resistente da laje deve ser superior a 40% do esforço de tração atuante no T inferior. No caso de não se verificar uma boa conexão, é necessário adicionar conectores de corte ou calcular o momento fletor resistente da secção transversal sem considerar a contribuição da laje de betão.

$$N_{c,Rd} \geq 0,4 N_{b,T,Ed} \quad (3.16)$$

### 3.5.4 Armadura Transversal

A norma EN 1994-1-1 admite que o corte longitudinal pode ser resistido por meios mecânicos através de reentrâncias no perfil da chapa metálica nervurada, atrito entre a superfície de betão e de aço, e ancoragem nos extremos proporcionada por conectores de corte. Os tipos de lajes mistas variam na forma, profundidade e espaçamento das nervuras e espessura da chapa. A chapa de aço tem uma espessura comercial que varia normalmente entre 0,75 e 1,50 mm e,

como fica exposta ao meio ambiente, é necessário que seja galvanizada a fim de protegê-la contra a corrosão (Guimarães, 2009). Para o dimensionamento da laje mista, os fabricantes deste tipo de chapas fornecem, em forma de catálogos ou especificações técnicas, a sobrecarga, vão e características técnicas da chapa metálica. O betão da laje pode possuir armadura inferior adicional e uma armadura superior para controlo de fendilhação ou para resistir a momentos negativos provocados pela continuidade da laje em apoios intermédios.

As vigas mistas devem possuir armadura transversal suficiente para impedir a rotura por esforço de corte longitudinal ao longo de uma superfície crítica na zona de aplicação dos conectores de corte, de acordo com a EN 1994-1-1. Quando as nervuras da chapa metálica nervurada são perpendiculares à viga mista, a resistência dos conectores é reduzida, considerando-se para esse efeito o fator  $k_t$ .

Na cláusula 6.6.6.4 da norma EN 1994-1-1, é definido o esforço de corte longitudinal resistente, sendo utilizado o método de escoras e tirantes para verificação da segurança da armadura transversal. A condição a ser satisfeita para chapas perfiladas com nervuras transversais é dada pela seguinte equação:

$$\frac{A_{sf}f_{yd}}{s_f} + A_p f_{yp,d} > \frac{v_{Ed} h_f}{\cot \theta} \quad (3.17)$$

Onde:

$A_{sf}$ - área da armadura da secção transversal;

$A_p$  - área da secção transversal da chapa perfilada nervurada por metro de comprimento da viga mista;

$f_{yd}$  - tensão de cedência da armadura;

$f_{yp,d}$  - tensão de cedência da chapa perfilada nervurada;

$s_f$  - espaçamento da armadura transversal;

$h_f$  – altura da superfície de rotura do betão;

$\theta$  - ângulo da escora comprimida com o eixo longitudinal (entre 45° e 26,5°);

$v_{Ed}$ - tensão de corte longitudinal na ligação do betão à viga alveolada,  $v_{Ed} = \frac{P_{Rd}}{s_{sc,l} h_c}$ ;

$s_{sc,l}$  – espaçamento longitudinal entre conectores de corte.

Por último, é necessário verificar o esmagamento das escoras comprimidas do betão, segundo a cláusula 6.2.4 da norma EN 1992-1-1.

### 3.6 Momento Fletor nas Aberturas

Para verificação da resistência ao momento fletor da secção transversal no centro de uma abertura, foram adotadas algumas simplificações com o intuito de simplificar o processo de cálculo por métodos analíticos. A Figura 17 ilustra o equilíbrio de forças sob ação de um momento fletor positivo, existindo uma força de tração desenvolvida no T inferior em redor da abertura, que se mantém constante em toda a largura da mesma. Esta força de tração é compensada por uma força de compressão no betão e no T superior. No entanto, dependendo das proporções da laje e dos T's, o esforço de compressão no T superior é geralmente dispensado.

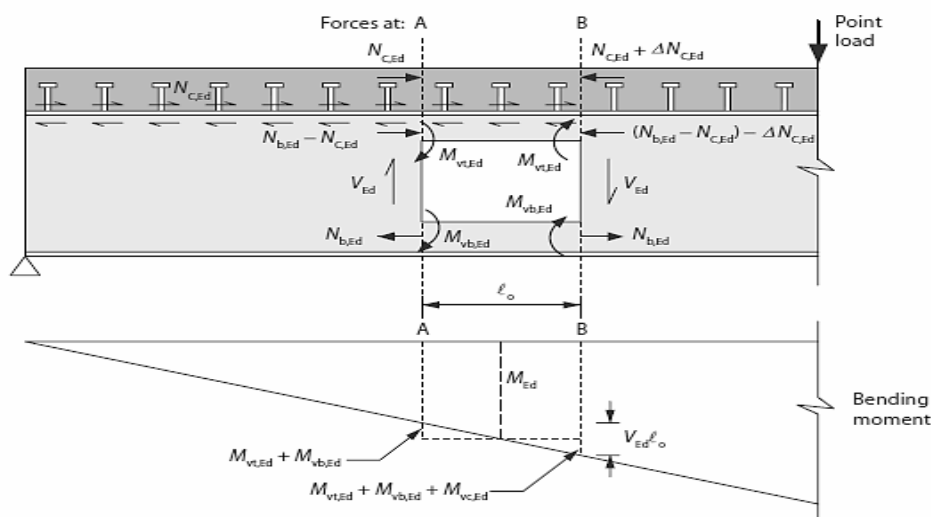


Figura 17 - Equilíbrio de forças em torno de uma abertura isolada (SCI-P355, 2011)

A força de compressão no betão é transmitida por conectores de corte soldados no topo da viga alveolada e geralmente distribuídos uniformemente ao longo da viga, ou, no caso de vigas sujeitas a cargas concentradas, em grupos com espaçamento uniforme dependente da força de corte aplicada (Lawson *et al.*, 2006).

A variação do momento fletor em redor da abertura é devida ao esforço transversal, resultando em flexão local dos T's por flexão de Vierendeel nos quatro cantos da abertura. A verificação da resistência à flexão global no centro da abertura, sendo a flexão de Vierendeel igual a zero, conduz ao valor de cálculo da força de tração no T inferior, dependendo da ação do momento



fletor global. Contudo, a posição em que a flexão de Vierendeel toma valores nulos não corresponde sempre ao centro da abertura, movendo-se para o lado da extremidade da abertura com menor momento fletor. Tal acontece se a componente resistente local de Vierendeel relativa à ação mista entre a laje e o T superior tomar valores relativamente elevados, originando uma redistribuição plástica. Esta hipótese simplifica a análise e resulta numa previsão conservadora da resistência (Lawson e Hicks, 2011).

O momento fletor resistente na abertura depende da conexão de corte e da classificação do T superior, mas, devido à ligação entre a laje de betão e a viga alveolada, normalmente esse momento é determinado em regime plástico.

### 3.6.1 Equilíbrio de Forças Internas

Segundo a norma SCI-P355, para se determinar o momento fletor resistente plástico, as forças dos T's e da laje de betão têm de estar em equilíbrio no centro da abertura. Duas hipóteses são possíveis para a localização do eixo neutro plástico: o primeiro caso, em que esse eixo se localiza na laje de betão, e o segundo caso, quando o eixo neutro se localiza no T superior da viga alveolada (ver Figura 18).

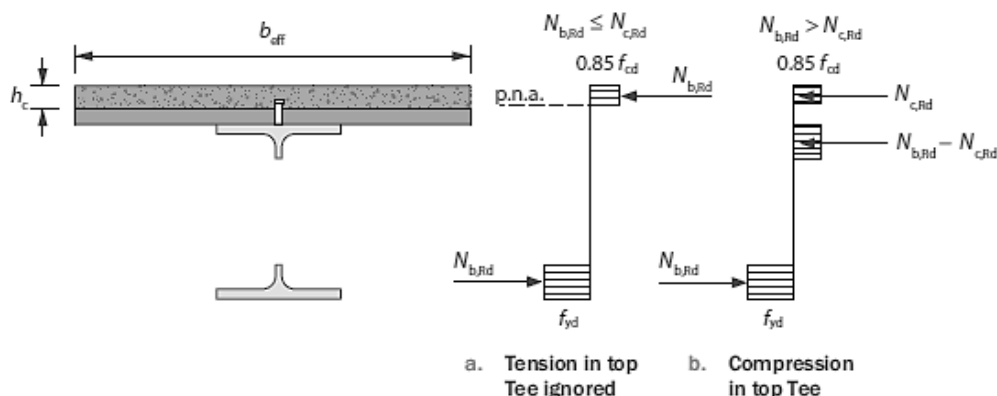


Figura 18 – Blocos de tensões em função da posição do eixo neutro plástico (SCI-P355, 2011)

#### 3.6.1.1 Eixo Neutro Plástico na Laje de Betão

Neste caso, a resistência à compressão da laje, correspondente a uma tensão de  $0.85 f_{cd}$  em todo o betão acima do eixo neutro, é superior à força de tração resistente do T inferior. A força de tração resistente do T inferior ( $N_{bT,Rd}$ ) é dada pela seguinte equação:

$$N_{bT,Rd} = \frac{A_{bT} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.18)$$

Onde:

$A_{bT}$  - área da secção transversal do T inferior;

$f_y$  - tensão de cedência do perfil de aço.

O esforço axial resistente à compressão da laje na abertura depende da conexão de corte e pode ser calculado através do número de conectores de corte existentes desde o apoio de extremidade até ao centro da abertura para vigas simplesmente apoiadas. Em vigas com chapa metálica nervurada de orientação perpendicular à viga, a resistência dos conectores de corte assume o seguinte valor:

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ 0,85 f_{cd} b_{eff,0} h_c, n P_{Rd} \right\} \quad (3.19)$$

Onde:

$f_{cd}$  - tensão de dimensionamento do betão ( $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ , de acordo com os valores definidos na EN 1992);

$b_{eff,0}$  - largura efetiva da laje de betão na abertura;

$n$  - número de conectores de corte desde o apoio mais próximo até ao centro da abertura;

$P_{Rd}$  - força de corte resistente de um conector.

Por equilíbrio de forças, o momento fletor plástico resistente na zona da abertura é dado por:

$$M_{0,Rd} = N_{bT,Rd} (h_{eff} + z_t + h_s - 0,5 z_c) \quad (3.20)$$

Onde:

$h_{eff}$  - altura efetiva entre o centro de gravidade dos T's;

$z_t$  - distância entre a extremidade do banzo inferior e o centro de gravidade do T superior;

$z_c$  - altura da laje de betão em compressão, dada por:

$$z_c = \frac{N_{c,Rd}}{0,85 f_{cd} b_{eff,0}} \leq h_c \quad (3.21)$$

Utilizando o mesmo modelo, o esforço axial de tração atuante no T inferior pode ser calculado pela equação (8) da SCI- P355, obtendo-se:

$$N_{bT,Ed} = \frac{M_{Ed}}{h_{eff} + z_t + h_s - 0,5z_c} \quad (3.22)$$

Como simplificação,  $z_c$  pode ser substituído por  $h_c$ .

### 3.6.1.2 Eixo Neutro Plástico no T Superior

Neste caso, a resistência à compressão da laje de betão é inferior ao esforço de tração resistente do T inferior, pelo que o equilíbrio de forças axiais em torno da abertura tem de ser mantido através da mobilização de um esforço de compressão no T superior. De um modo conservativo, quando a viga está sujeita a um carregamento uniformemente distribuído, a capacidade resistente do T superior é:  $N_{tT,Rd} = N_{bT,Rd} - N_{c,Rd}$  (Lawson e Hicks, 2011).

Por equilíbrio de forças no centro de gravidade do T superior, o valor de cálculo do momento fletor resistente plástico na zona da abertura é definido por:

$$M_{0,Rd} = N_{bT,Rd} h_{eff} + N_{c,Rd}(z_t + h_s - 0,5h_c) \quad (3.23)$$

Neste caso, a equação 3.16 pode ser usada para determinar a força de tração no T inferior. Caso contrario, se  $N_{bT,Ed} > N_{c,Rd}$ , a força de tração no T inferior deve ser obtida a partir da seguinte equação:

$$N_{bT,Ed} = \frac{M_{ed} - N_{c,Rd}(z_t + h_s - 0,5h_c)}{h_{eff}} \quad (3.24)$$

Em que, por equilíbrio de forças horizontais, o esforço axial no T superior é igual a:

$$N_{tT,Ed} = N_{bT,Ed} - N_{c,Rd} \quad (3.25)$$

### 3.7 Esforço Transverso

Em vigas alveoladas, o esforço transverso resistente é seriamente diminuído devido à presença das aberturas (Lawson e Hicks, 2011). A resistência ao esforço transverso da secção transversal na zona da abertura de uma viga alveolada é definida pela soma simplificada das resistências de corte dos T inferior e superior da viga alveolada e da laje de betão no caso de uma viga alveolada mista. Este método é simples e conservativo para um carregamento uniformemente distribuído, em que o esforço transverso atuante em todo o comprimento da abertura equivalente é o valor mais elevado que atua nas suas extremidades. Para uma carga concentrada, o esforço transverso atuante mantém-se constante ao longo da abertura.

A encurvadura por esforço transverso é também uma possibilidade em vigas de aço, devendo ser feita uma verificação da resistência da alma a fim de evitar este fenómeno. A esbelteza da alma de uma viga não deve exceder os limites da equação 3.26, definida na norma EN 1993-1-1:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (3.26)$$

Onde:

$h_w$ - altura da alma do perfil;

$t_w$ - espessura da alma;

$\eta$  - valor conservativamente tomado igual a 1,0;

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} .$$

Caso a equação 3.26 não seja satisfeita, segundo a EN 1993-1-1, a verificação da resistência à encurvadura por esforço transverso deverá ser efetuada de acordo com a norma EN 1993-1-5.

#### 3.7.1 Esforço Transverso Resistente na Abertura

A resistência plástica ao esforço transverso é estabelecida com base na área de corte da secção transversal,  $A_v$ . De acordo com a norma EN 1993-1-1, o esforço transverso resistente plástico de uma secção de aço é definido por:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (3.27)$$

Para um perfil com aberturas, a área de corte da secção de aço transversal na alma é constituída pelos elementos em T. Contudo, em aberturas circulares, a abertura retangular equivalente não é considerada, sendo adotada a sua altura real. Desta forma, pode-se afirmar que é obtido um valor do lado da segurança na resistência ao esforço transversal. Com base na EN 1993-1-1, pode definir-se a área de corte da secção transversal de aço, a qual, para um T, é dada pelas seguintes equações:

Para secções laminadas:

$$A_v = (A - b_t t_f + (2r + t_w) \times 0,5 t_f) \quad (3.28)$$

E para secções soldadas:

$$A_v = t_w (h_{w,T} - 0,5 t_f) \quad (3.29)$$

Onde:

A - área transversal total de viga alveolada;

$b_f$  - largura do banzo;

$t_w$  - espessura da alma;

$t_f$  - espessura do banzo;

r - raio de concordância;

$h_{w,T}$  - altura do T.

O esforço transversal resistente plástico da secção transversal na abertura é obtido pela soma das áreas de corte do T superior ( $A_{v,tT}$ ) e do T inferior ( $A_{v,bT}$ ). Assim:

$$V_{pl,Rd} = \frac{(A_{v,tT} + A_{v,bT}) f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (3.30)$$

### 3.7.2 Esforço Transverso Resistente da Laje de Betão

Segundo Lawson *et al.* (1992), em vigas alveoladas mistas a contribuição da laje de betão pode ser considerada para resistir ao esforço transversal. Este valor pode ser calculado de modo conservativo, considerando uma largura efetiva do banzo de betão com base num modelo equivalente para ter em conta o efeito de punção e arrancamento dos conectores, o qual depende da altura efetiva da laje ( $h_{s,eff}$ ).

O esforço transversal resistente da laje de betão sem armadura transversal pode ser obtido, segundo a norma EN 1992-1-1, por:

$$V_{c,Rd} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w h_c \geq [v_{min} + k_1 \sigma_{cp}] b_w h_c \quad (3.31)$$

Onde:

$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c$  (definido no anexo nacional da norma EN 1992-1-1);

$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$  (com altura  $d$  em  $mm$ );

$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$ ;

$A_{sl}$  – área da armadura longitudinal superior da laje de betão;

$k_1 = 0,15$ ;

O fator  $\sigma_{cp}$  pode ser dispensado em aberturas situadas próximas dos apoios, contudo em zonas de momentos fletores elevados, este fator assume valores consideráveis, sendo dado

por:  $\sigma_{cp} = \frac{N_{c,Ed}}{b_{eff} h_c} < 0,2 f_{cd}$ ;

$b_w$  – largura efetiva da laje de betão =  $b_f + 2h_{s,eff}$ ;

$b_f$  – altura do T superior;

$h_{s,eff}$  – altura efetiva da laje de betão para efeitos de punçoamento e arrancamento dos conectores  $\simeq 0,75h_s$ ;

$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$ .

### 3.8 Momento de Vierendeel

Depois de definido o momento fletor resistente na abertura da viga alveolada, o aumento da resistência da secção transversal é determinado o momento fletor resistente de Vierendeel. Devido à ação mista local desenvolvida entre a laje e o perfil metálico, o valor do momento fletor resistente de Vierendeel é superior ao das vigas metálicas equivalentes, originando a possibilidade da criação de aberturas com dimensões superiores. Desta forma, a resistência à flexão de Vierendeel consiste na soma dos momentos fletores locais resistentes nos quatro

cantos da abertura com o momento fletor resistente devido à interação do T superior com a laje de betão.

O momento fletor resistente total de Vierendeel não deve ser inferior à diferença dos valores dos momentos fletores atuantes, provocados pelo esforço transversal à esquerda e à direita da abertura equivalente, definidos pela seguinte equação (Bitar *et al.*, 2006):

$$V_{Ed} \leq (2M_{bT,NV,Rd} + 2M_{tT,NV,Rd} + M_{vc,Rd})/l_e \quad (3.32)$$

Onde:

$M_{bT,NV,Rd}$  - momento fletor resistente reduzido do T inferior devido a tração e a esforço transversal;

$M_{tT,NV,Rd}$  - momento fletor resistente reduzido do T superior devido a compressão e a esforço transversal;

$M_{vc,Rd}$  - momento fletor resistente local de Vierendeel, definido no Capítulo 3.8.6;

$l_e$  - comprimento equivalente da abertura para o momento de Vierendeel.

O comprimento equivalente para aberturas retangulares é definido como o seu comprimento real  $l_0$ ; porém em aberturas circulares, o método de cálculo estipula uma abertura retangular equivalente, sendo a sua altura equivalente  $h_e = 0,9h_0$  e o seu comprimento equivalente  $l_e = 0,45h_0$  ( $h_0$  = diâmetro da abertura circular).

Na prática, os momentos resistentes de Vierendeel são superiores aos definidos pela Equação 3.32. O endurecimento do aço deformado nos cantos da abertura não é tido em conta, desprezando-se esse efeito positivo no dimensionamento.

A resistência à flexão de Vierendeel depende da classificação dos T's superior e inferior. É permitida uma análise dos T's com base no seu comportamento plástico ou elástico. Em geral, os esforços axiais atuantes nos T's são determinados com base nos blocos retangulares (plásticos) de tensões, provocando uma redução dos momentos fletores resistentes na abertura (Lawson e Hicks, 2011; Oliveira, 2012).

### 3.8.1 Classificação da Secção Transversal

A classificação das secções transversais tem como objetivo identificar em que medida a sua resistência e a sua capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de encurvadura local.

A secção deve ser classificada de acordo com a classe menos favorável do elemento de aço sujeito a compressão. São definidas quatro classes de secções transversais:

- I. As secções transversais da Classe 1 são aquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência;
- II. As secções transversais da Classe 2 são aquelas que podem atingir o momento plástico resistente, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local;
- III. As secções transversais da Classe 3 são aquelas em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local impede que o momento plástico resistente seja atingido;
- IV. As secções transversais da Classe 4 são aquelas em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal.

Nas secções transversais de Classes 1 e 2, é possível efetuar-se um estudo baseado em análise plástica, enquanto para Classes 3 e 4 tem de se proceder a uma análise elástica da secção. Este tipo de classificação na zona da abertura de uma viga mista alveolada simplesmente apoiada abrange os banzos do perfil de aço e a alma dos T's superior e inferior. No cálculo do momento fletor resistente de Vierendeel, pode admitir-se uma redução da altura da alma de Classe 3 para um valor apropriado correspondente ao limite de Classe 2, desde que o banzo da secção em T seja de Classe 1 ou 2 (Lawson e Hicks, 2011).

#### **3.8.1.1 Classificação dos Banzos**

A classificação dos banzos é feita de acordo com o Quadro 5, indicado na EN 1993-1-1. Geralmente, em vigas alveoladas, os banzos são de Classe 1, 2 ou 3. Só é permitido o uso de banzos de Classe 3 se a conexão da laje de betão com o perfil de aço for estabelecida através de conectores conforme o especificado na EN 1994-1-1, cláusula 6.6.5.5. Nesse caso, mesmo sendo de Classe 3, pode considerar-se o banzo superior como pertencente à Classe 1 ou 2.



Quadro 5-Valores limite das esbeltezas para a classificação dos banzos (EN 1993-1-1, 2010)

| Banzos em consola  |                                    |   |      |                  |   |      |  |
|--|------------------------------------|---|------|------------------|---|------|--|
|  |                                    |   |      |                  |   |      |  |
| Secções laminadas  |                                    |   |      | Secções soldadas |   |      |  |
| Classe   | Componente solicitado à compressão | Componente solicitado à flexão e à compressão |      |                  |   |      |  |
|  |                                    | Extremidade comprimida                        |      |                  | Extremidade traccionada                           |      |  |
| Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva) |                                    |   |      |                  |   |      |  |
| 1  | $c/t \leq 9\epsilon$               | $c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$           |      |                  | $c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$  |      |  |
| 2  | $c/t \leq 10\epsilon$              | $c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$          |      |                  | $c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$ |      |  |
| Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva) |                                    |   |      |                  |   |      |  |
| 3  | $c/t \leq 14\epsilon$              | $c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$          |      |                  |   |      |  |
| Para $k_\sigma$ ver a EN 1993-1-5                              |                                    |   |      |                  |   |      |  |
| $\epsilon = \sqrt{235/f_y}$                                    | $f_y$                              | 235   | 275  | 355              | 420   | 460  |  |
|  | $\epsilon$                         | 1,00  | 0,92 | 0,81             | 0,75  | 0,71 |  |

### 3.8.1.2 Classificação da Alma

A classificação da alma da secção transversal na zona da abertura de uma viga alveolada mista é definida nos pontos: 3.4.2 da SCI-P355 e N.1.7.2 do anexo N da ENV 1993-1-1. Esta classificação é feita em função da altura do T,  $h_w$ , e do comprimento efetivo da abertura,  $l_{0,eff}$ . De uma forma conservativa, admite-se que os elementos em consola do T estão parcialmente comprimidos. Considera-se ainda:

$$l_{0,eff} = l_0 \quad \text{para aberturas retangulares} \quad (3.33)$$

ou

$$l_{0,eff} = 0,7 h_0 \quad \text{para aberturas circulares} \quad (3.34)$$

Para almas classificadas de Classe 4, usa-se o valor limite  $h_w$  da Classe 3 no cálculo das propriedades elásticas efetivas da secção transversal. Uma viga metálica alveolada em situação de flexão global está sujeita a esforços significativos de compressão no T superior e, como tal,

a classificação definida no Quadro 6 não deve ser considerada. Nesta situação, a classificação da alma do T pode ser substituída pela classificação baseada na cláusula 5.5.2 da norma EN 1993-1-1, correspondente a banzos em consola.

Quadro 6-Classificação da alma de uma secção em T (ENV 1993-1-1 Annex N, 1998)

| Classe | Limitação da altura da alma, $h_w$ , segundo o comprimento efetivo |  |  |
|--------|--|--|--|
|        | $l_{o,eff} \leq 32\epsilon t_w$                                    | $32\epsilon t_w < l_{o,eff} < 36\epsilon t_w$  | $l_{o,eff} > 36\epsilon t_w$   |
| 2      | Sem limite   | $h_w \leq \frac{10\epsilon t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{32\epsilon t_w}{l_{o,eff}}\right)^2}}$ |  |
| 3      | Sem limite   |  | $h_w \leq \frac{14\epsilon t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{36\epsilon t_w}{l_{o,eff}}\right)^2}}$ |
| 4      | Sem limite   |  |  |

### 3.8.2 Efeito do Esforço Axial na Classificação da Secção Transversal

Caso o T inferior esteja sujeito a um esforço axial de tração, as almas de Classe 3 podem consideradas como sendo de Classe 2 se o bloco retangular de tensões plásticas não exceder o valor de  $10\epsilon t_w$  para a altura da alma em compressão. Tal equivale a satisfazer a seguinte equação, indicada na SCI- P355:

$$\frac{N_{bT,Ed}}{A_{bT}f_y/\gamma_{M0}} \geq 1 - \frac{20\epsilon t_w^2}{A_{bT}} \quad (3.35)$$

Onde:

$N_{bT,Ed}$  - tração no T inferior;

$A_{bT}$  - área da secção transversal do T inferior;

$t_w$ - espessura da alma do T inferior.

Também é estipulado que, devido ao esforço axial de tração no T inferior, almas de Classe 4 podem ser consideradas de Classe 3, caso se verifique a seguinte equação:

$$h_{wb} \leq \frac{14t_w\varepsilon'}{\sqrt{1 - \left(\frac{36t_w\varepsilon'}{l_{0,eff}}\right)^2}} \quad e \quad l_{0,eff} > 36t_w\varepsilon' \quad (3.36)$$

Onde:

$$\varepsilon' = \varepsilon / \left(1 - \frac{N_{bT,Rd}}{A_b f_y / \gamma_{M0}}\right)^{0.5};$$

$h_{wb}$  - altura da alma do T inferior.

### 3.8.3 Diminuição da Espessura de Alma devida ao Esforço Transverso

Este efeito reduz a resistência à flexão de Vierendeel e a distribuição de esforço transverso na secção transversal. Segundo a EN 1994-1-1, é indispensável reduzir da espessura da alma quando o valor de esforço transverso atuante é superior a 50% do valor de esforço transverso resistente, tal que,  $\rho = V_{Ed}/V_{Rd} > 0,5$ . Caso contrario, considera-se para cálculo do momento resistente de Vierendeel toda a espessura da alma.

A espessura reduzida da alma dos T's é definida, segundo a norma SCI-P355, pela seguinte equação:

$$t_{w,eff} = t_w(1 - (2\rho - 1)^2) \quad \text{para } \rho > 0,5 \quad (3.37)$$

Onde:

$$\rho = V_{Ed}/V_{Rd};$$

$V_{Ed}$  – esforço transverso de dimensionamento;

$V_{Rd}$  – esforço transverso resistente da secção transversal =  $V_{c,Rd} + V_{t,Rd} + V_{b,Rd}$ ;

$V_{c,Rd}$  – esforço transverso resistente plástico da laje de betão;

$V_{t,Rd}$  - esforço transverso resistente plástico do T superior;

$V_{b,Rd}$  - esforço transverso resistente plástico do T inferior.

Com a diminuição da espessura da alma, a área efetiva da secção transversal dos T's passa a ser:

$$A_{w,eff} = h_{w,t} t_{w,eff} \quad (3.38)$$

### 3.8.4 Momento Fletor Resistente Plástico

Para T's que satisfaçam os limites da Classe 1 ou 2, o momento fletor resistente plástico pode obter-se a partir dos blocos de tensões plásticas na zona de aberturas. Na Figura 17 são esquematizadas as tensões nesse regime.

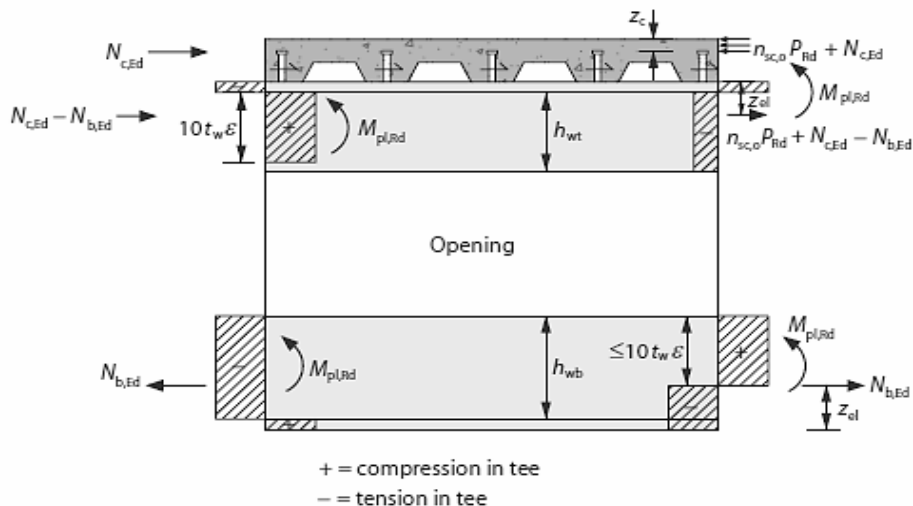


Figura 17 - Tensões devidas ao momento fletor plástico numa abertura (SCI-P355, 2011)

Na ausência de tensões axiais na viga alveolada, o momento fletor resistente plástico do T é determinado por equilíbrio de momentos (ver equação 19 da SCI-P355), considerando o eixo neutro plástico localizado num dos banzos. Assim:

$$M_{pl,Rd} = \frac{A_{w,T} f_y}{\gamma_{M0}} \left( \frac{h_{w,T}}{2} + t_f - z_{pl} \right) + \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} \left( \frac{t_f}{2} - z_{pl} + \frac{z_{pl}^2}{t_f} \right) \quad (3.39)$$

Onde:

$z_{pl}$  - distância entre o eixo neutro plástico e a extremidade do banzo,  $z_{pl} = (A_f +$

$A_{w,T})/2 b_f$ ;

$A_{w,T}$  - área da secção transversal do T (se  $\rho > 0,5$ , usar  $A_{w,eff}$  em vez de  $A_{w,T}$ );

$A_f$  - área da secção transversal do banzo;

$b_f$  - largura do banzo;

$t_f$  - espessura do banzo.



$$z_{el} = \frac{A_{w,T} \left( \frac{h_{w,T}}{2} + t_f \right) + \frac{t_f A_f}{2}}{A_f + A_{w,T}} \quad (3.42)$$

Tal como na análise plástica, o momento fletor resistente em regime elástico deve ser reduzido na presença de esforços axiais na viga alveolada, de acordo com a seguinte equação, indicada na ENV 1993-1-1 Annex N:

$$M_{el,Rd} = M_{el,Rd} \left( 1 - \frac{N_{T,Ed}}{N_{Rd}} \right) \quad (3.43)$$

### 3.8.6 Momento Fletor Resistente Local em Vigas Alveoladas Mistas

O momento fletor resistente local resulta da interação entre o T superior da viga alveolada com a laje de betão através de conectores de corte. Esta resistência depende da força de compressão desenvolvida nos conectores de corte aplicados diretamente acima de cada abertura,  $\Delta N_{c,Rd}$ , e também de um fator de redução conservativo,  $k_0$ , que permite a flexibilidade da viga alveolada na zona da abertura de forma controlada (Lawson *et al.*, 2006).

O momento fletor resistente local de Vierendeel é definido pela seguinte equação da SCI-P355:

$$M_{vc,Rd} = k_0 \Delta N_{c,Rd} \left( h_s + z_t - \frac{h_c}{2} \right) \quad (3.44)$$

Onde:

$\Delta N_{c,Rd}$  - força de compressão devida aos conectores de corte existentes no comprimento real da abertura  $\Delta N_{c,Rd} = n_{sc,o} P_{Rd}$ ;

$k_0$  - fator de redução de flexibilidade da abertura;

$h_s$  - altura total da laje de betão;

$h_c$  - altura do betão sobre a chapa metálica nervurada;

$n_{sc,o}$  - número de conectores de corte existentes em cima da abertura;

$P_{Rd}$  - força de corte resistente de um conector;

$z_t$  - distância entre a extremidade do banzo superior e o centro de gravidade do T superior.

O fator de redução  $k_0$ , definido na SCI-P355, tem conta o efeito da flexibilidade de uma abertura alongada (ver Figura 19), pois relaciona o comprimento e a altura do T superior. Em

grandes aberturas, são desenvolvidos esforços de tração nos conectores de corte que podem provocar deslocamentos e consequentemente fendilhação da laje de betão.

$$k_0 = \left(1 - \frac{l_o}{25h_t}\right) \quad (3.45)$$

Onde:

$l_o$  - comprimento da abertura;

$h_t$  - altura do T superior.

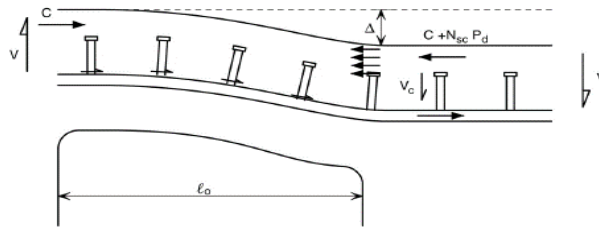


Figura 19 - Efeito da flexibilidade de uma abertura alongada (Lawson *et al.*, 2006)

Contudo, o momento fletor resistente local tem um limite máximo para a interação entre o T superior e a laje de betão. Esse limite depende da força máxima necessária para arrancar um conector de corte nas extremidades da abertura (Bitar *et al.*, 2006). Assim tem-se:

Em nervuras que contenham apenas um conector de corte:

$$M_{vc,Rd} \leq l_o F_{ten,max} \quad (3.46)$$

E para nervuras que contenham 2 conectores de corte:

$$M_{vc,Rd} \leq 1.5 l_o F_{ten,max} \quad (3.47)$$

Em que,  $F_{ten,max}$ , representa o esforço de tração resistente de um conector.

### 3.9 Esforço de Corte Longitudinal

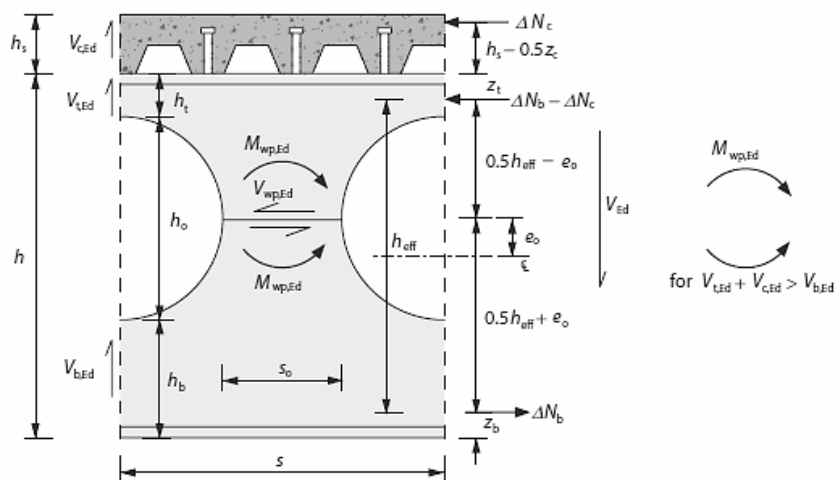


Figura 20 - Equilíbrio de forças e momentos entre aberturas circulares (SCI-P355, 2011)

A Figura 20 ilustra a força de corte no eixo longitudinal entre aberturas,  $V_{wp,Ed}$ , esta pode ser estabelecida pela formação de um esforço de tração no T inferior, sendo consideradas duas hipóteses para obter a maior força de corte longitudinal.

Na primeira hipótese, e como primeira aproximação, é assumido que a conexão de corte entre aberturas é total, formando-se um esforço axial na laje equivalente ao esforço incremental desenvolvido no T inferior entre eixos de aberturas adjacentes ( $V_{wp,Ed} = \Delta N_{cs} = nPrd$ ). Fazendo o equilíbrio de forças na laje de betão, o esforço de corte longitudinal atuante entre aberturas é definido na SCI-P355 do seguinte modo:

$$V_{wp,Ed} = \frac{s V_{Ed}}{h_{eff} + z_{t+} + h_s - \frac{h_c}{2}} \quad (3.48)$$

Onde:

$s$  - distância entre eixos das aberturas;

$V_{Ed}$  - esforço transversal atuante entre aberturas.

Na segunda hipótese, considera-se que a conexão de corte entre aberturas é parcial. Assim, o esforço de corte longitudinal será superior, devido à falta de conexão entre a laje de betão e o T superior. Este valor de esforço de corte longitudinal é definido na SCI-P355 por:



$$V_{wp,Ed} = \frac{sV_{Ed} - \Delta N_{cs,Rd} \left( z_t + h_s - \frac{h_c}{2} \right)}{h_{eff}} \quad (3.49)$$

Ao verificar a resistência ao corte longitudinal entre aberturas, é preciso que o maior valor de cálculo do esforço de corte longitudinal, de acordo com as hipóteses acima descritas, seja menor que o valor resistente, dado pela seguinte equação de Bitar *et al.* (2006):

$$V_{wp,Rd} = \frac{s_o t_w f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (3.50)$$

Em que  $s_o$  representa a distância da secção entre aberturas.

### 3.10 Momento Fletor na Alma entre Aberturas

A secção entre aberturas é sujeita à flexão de Vierendeel, que nas vigas com aberturas retangulares pode ser bastante elevada devido à flexão acima do eixo longitudinal e à força de corte longitudinal. Em aberturas circulares, tal não acontece porque a ampliação do comprimento entre aberturas permite um aumento do momento fletor resistente.

De acordo com Lawson e Hicks (2011), em vigas alveoladas com aberturas a meia altura, o valor do momento fletor atuante a meia altura da secção entre aberturas,  $M_{wp,Ed}$ , é nulo, devido aos os esforços transversos atuantes resistidos pelos T's superior e inferior terem valores análogos, resultando em momentos fletores opostos e iguais aos binários desenvolvidos na zona superior e inferior entre aberturas. Quando a distribuição de esforço transversal adotada faz com que as secções em T e a laje de betão tenham valores diferentes, resulta um momento fletor a meia altura entre aberturas. O momento fletor atuante entre aberturas a meia altura da secção é definido na SCI-P355 pela seguinte equação:

$$M_{wp,Ed} = s_o \left( V_{t,Ed} - V_{b,Ed} + V_{c,Ed} \right) + 2V_{wp,Ed}e_o - \Delta N_{cs} \left( z_t + h_s - \frac{h_c}{2} \right) \quad (3.51)$$

Onde :

$V_{Ed}$  - esforço transversal atuante no centro da secção entre aberturas;

$V_{t,Ed}$  - esforço transversal atuante no T superior;

$V_{b,Ed}$  - esforço transversal atuante no T inferior;

$V_{c,Ed}$  - esforço transversal atuante na laje de betão, podendo ser substituído por  $V_{c,Rd}$ ;

$e_0$  - excentricidade entre o centro geométrico da abertura e o centro geométrico da viga alveolada;

$\Delta N_{cs}$  - esforço incremental de compressão nos conectores de corte da laje de betão no comprimento entre aberturas,  $s_0$ .

Por equilíbrio de forças verticais, o esforço transversal do T superior,  $V_{t,Ed}$ , é obtido por:

$$V_{t,Ed} = V_{Ed} - V_{c,Ed} - V_{b,Ed} \quad (3.52)$$

Substituindo este valor na equação 3.51, obtém-se:

$$M_{wp,Ed} = s(V_{Ed} - 2V_{b,Ed}) + 2V_{wp,Ed}e_0 - \Delta N_{cs}\left(z_t + h_s - \frac{h_c}{2}\right) \quad (3.53)$$

### 3.10.1 Momento Fletor Resistente na Alma entre Aberturas

O cálculo do momento fletor resistente entre aberturas deve ser obtido com base no seu valor elástico, tanto para aberturas retangulares, como para aberturas circulares, localizado a meia altura da alma da viga alveolada. Segundo Lawson *et al.* (2006), o ponto crítico para o momento fletor entre aberturas é a zona superior na secção entre aberturas, devido ao efeito combinado do momento fletor com o esforço de corte longitudinal. O valor do momento fletor resistente entre aberturas é definido na SCI-P355 do seguinte modo:

Para aberturas circulares:

$$M_{wp,Rd} = \frac{s_0^2 t_w f_y}{6\gamma_{M0}} \quad (3.54)$$

E para aberturas retangulares:

$$M_{wp,Rd} = \frac{h_o V_{wp,Ed}}{2} + |M_{wp,Ed}| \quad (3.55)$$

### 3.11 Encurvadura da Alma entre Aberturas

A encurvadura da alma entre aberturas de vigas alveoladas é um dos fenómenos mais complexos em elementos comprimidos, dependendo de vários parâmetros: da configuração geométrica da abertura, da excentricidade da abertura em relação ao eixo longitudinal, e principalmente da esbelteza da alma na abertura. Se o espaçamento das aberturas for reduzido, também poderá ocorrer encurvadura próximo dos apoios, devida a elevadas forças de corte longitudinal. Para diminuir a esbelteza, é possível aplicar reforços verticais na alma da viga alveolada (Rodrigues, 2007).

Lawson *et al.* (2006) propuseram uma metodologia baseada num modelo de escoras “strut-model”, calibrada através de análises por elementos finitos. Segundo esse modelo, as tensões de compressão e tração devidas ao esforço de corte no eixo longitudinal, ilustradas na Figura 21, variam na zona da abertura.

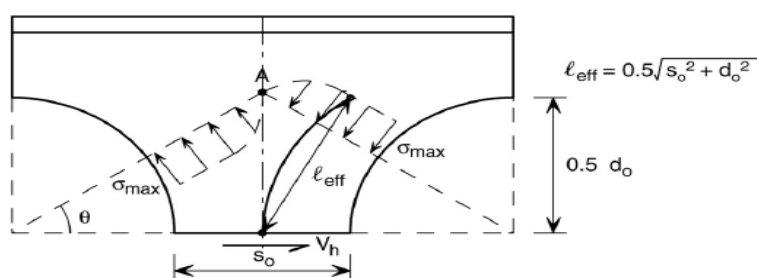


Figura 21 - Tensões de compressão entre aberturas circulares (Lawson et al., 2006)

A verificação à encurvadura é distinta para aberturas adjacentes e para aberturas afastadas. Na primeira situação, a largura total da secção entre aberturas adjacentes resiste ao esforço de compressão proveniente do esforço de corte longitudinal. Na segunda situação, o esforço de compressão considerado é resistido por uma largura efetiva da alma ( $l_{eff} = l_w$ ), pelo que a possibilidade de encurvadura não depende do espaçamento das aberturas. De uma forma simplificada, podem considerar-se aberturas adjacentes quando o espaçamento entre elas é igual ou inferior ao comprimento da abertura. Pelo contrário, aberturas cujo espaçamento é superior ao seu comprimento denominam-se de aberturas afastadas (Lawson e Hicks, 2011).

### 3.11.1 Verificação da Encurvadura entre Aberturas Afastadas

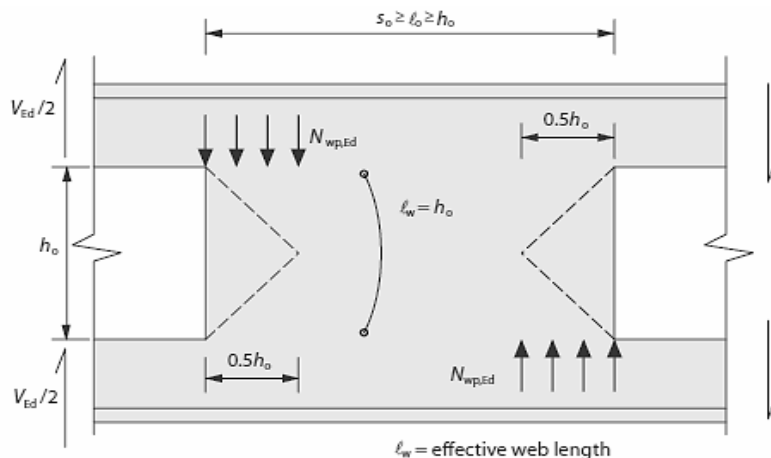


Figura 22 - Encurvadura entre aberturas afastadas (SCI-P355, 2011)

Em aberturas afastadas, adotam-se comprimentos de encurvadura  $l_w = h_o$  e  $l_w = 0.7h_o$ , para aberturas retangulares e circulares/alongadas, respetivamente. A norma SCI-P355 preconiza um modelo onde, nas extremidades das aberturas, é considerada uma força de compressão vertical, que se desenvolve numa largura efetiva de  $h_o/2$ . O seu valor é definido como o esforço transverso máximo atuante no T superior (conjuntamente com a laje de betão) ou no T inferior.

$$N_{wp,Ed} = V_{T,Ed} = \max \left\{ \begin{matrix} V_{t,Ed} + V_{c,Ed} \\ V_{b,Ed} \end{matrix} \right. \quad (3.56)$$

Para o cálculo da resistência à encurvadura da alma, é necessário determinar o coeficiente de redução de encurvadura,  $\chi$ , definido na norma EN 1993-1-1 para elementos solicitados à compressão. Porém, a esbelteza normalizada é definida de acordo com os comprimentos de encurvadura de cada tipo de abertura, segundo a SCI-P355. Assim, obtêm-se as seguintes esbeltezas normalizadas para aberturas retangulares (equação 3.57) e circulares/alongadas (equação 3.58).

$$\bar{\lambda} = \frac{7h_o}{2t_w\lambda_1} \quad (3.57)$$

e

$$\bar{\lambda} = \frac{5h_o}{2t_w\lambda_1} \quad (3.58)$$

Em que a constante  $\lambda_1$  é definida pela norma EN 1993-1-1 por:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (3.59)$$

A resistência à encurvadura também depende do fator de imperfeição,  $\alpha$ . Lakusic *et al.* (2008) consideram que o processo de fabricação de vigas alveoladas faz com que as imperfeições geométricas iniciais sejam maiores do que nos perfis laminados e mais próximas das dos perfis soldados. Para esclarecer esta questão, estes autores realizaram ensaios de laboratório com vigas alveoladas e, a partir dos resultados destes ensaios, recomendaram a curva de encurvadura c para  $h/b_f > 2$  e a curva b para  $h/b_f \leq 2$ . Os autores afirmam que, com estas modificações nas curvas, consegue-se manter o índice de fiabilidade de 3,8 aconselhado pela EN 1993-1-1.

Para aberturas afastadas, a resistência à encurvadura é definida de acordo com a SCI-P355 por:

$$N_{wp,Rd} = \chi \frac{h_o t_w f_y}{2\gamma_{M0}} \quad (3.60)$$

A verificação à encurvadura para aberturas afastadas pode ser ignorada se os seus efeitos forem demasiado pequenos, ou seja, quando  $h_o/t_w \leq 25$  para aberturas circulares e  $h_o/t_w \leq 20$  para aberturas retangulares.

### 3.11.2 Verificação da Encurvadura para Aberturas Adjacentes

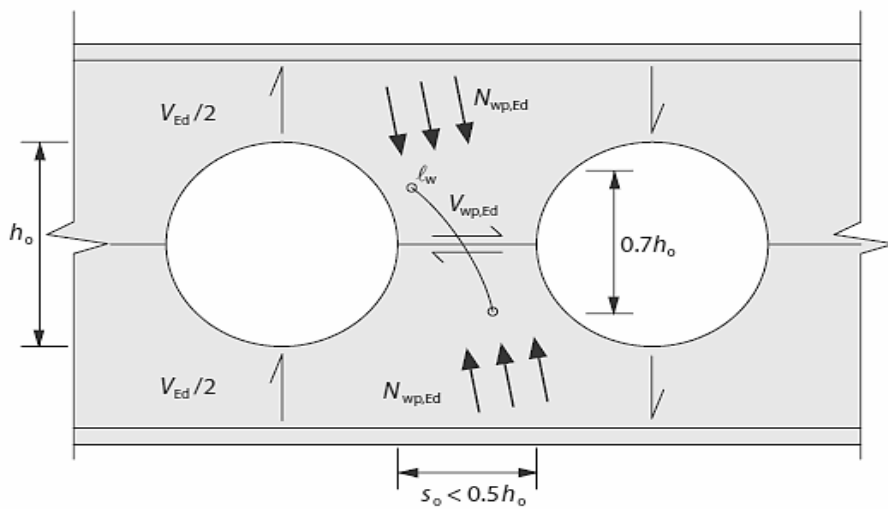


Figura 23 - Encurvadura entre aberturas adjacentes (SCI-P355, 2011)

Em aberturas adjacentes, o esforço de corte longitudinal a meia altura da secção entre aberturas é usado para determinar os esforços de compressão. O esforço de compressão atuante, para situações em que o momento fletor a meia altura é nulo, resulta igual ao esforço de corte longitudinal,  $V_{wp,Ed}$ . O valor do esforço de compressão atuante é dado na SCI-P355 por:

$$N_{wp,Ed} = V_{wp,Ed} + \frac{|M_{wp,Ed}|}{0,5h_o} \quad (3.61)$$

Consideram-se os comprimentos de encurvadura  $l_w = 0,7\sqrt{s_o^2 + h_o^2}$  e  $l_w = 0,5\sqrt{s_o^2 + h_o^2}$ , para aberturas retangulares e circulares/alongadas, respetivamente. Tal como nas aberturas afastadas, é necessário determinar o coeficiente de redução de encurvadura  $\chi$ , definido na norma EN 1993-1-1. Contudo, a esbelteza normalizada é definida de acordo com os comprimentos de encurvadura de cada tipo de abertura, segundo a SCI-P355. Obtêm-se assim as seguintes esbeltezas normalizadas para aberturas retangulares e circulares/alongadas, respetivamente:

$$\bar{\lambda} = \frac{5,0\sqrt{s_o^2 + h_o^2}}{t_w \lambda_1} \quad (3.62)$$

e

$$\bar{\lambda} = \frac{1,75\sqrt{s_o^2 + h_o^2}}{2 t_w \lambda_1} \quad (3.63)$$

Em que a constante  $\lambda_1$  é definida pela norma EN 1993-1-1. A resistência à encurvadura em aberturas adjacentes é definida, de acordo com a SCI-P355, por:

$$N_{wp,Rd} = \chi \frac{s_o t_w f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.64)$$

### 3.12 Limitação do Esforço Transverso Resistente

O esforço transverso resistente em vigas alveoladas com aberturas adjacentes sofre redução, devido à resistência à flexão e à encurvadura das zonas entre aberturas. Através da reformulação das equações de equilíbrio, é possível obter equações aproximadas para o valor máximo do esforço transverso resistente (Lawson e Hicks, 2011). Lawson *et al* (2006), admitem que a percentagem de esforço transverso resistente no T inferior pode variar entre

10% a 50% do esforço transversal total, dependendo da simetria da secção transversal. Para aberturas centradas na alma, 50% do esforço transversal pode distribuir-se por cada secção em T, desde que o esforço transversal atuante no T inferior não exceda o máximo especificado na SCI-P355, que é:

$$V_{b,Ed} = 2 M_{bT,NV,Rd} / l_e \quad (3.65)$$

Onde:

$M_{bT,NV,Rd}$  – momento fletor resistente reduzido do T inferior;

$l_e = 0,45 d_o$ .

### 3.12.1 Esforço Transverso Resistente em Vigas com Aberturas Circulares

De acordo com a SCI-P355, o esforço transversal máximo no T inferior é devido ao momento fletor de Vierendeel, ocorrendo quando o momento fletor entre aberturas iguala a sua resistência elástica à flexão ( $M_{wp,Ed} = M_{wp,Rd}$ ).

Assim, o esforço transversal resistente é limitado pela flexão entre aberturas. No caso de conexão parcial ( $V_{wp,Ed} > \Delta N_{cs,RD}$ ), é dado por:

$$V_{Rd} = \frac{2M_{wp,Rd}/s + 4 M_{b,NV,Rd}/l_o}{1 + 2e_0/h_{eff}} + \frac{\Delta N_{cs,Rd}}{s} \left( z_t + h_s - \frac{h_c}{2} \right) \quad (3.66)$$

Em situação de conexão total ( $V_{wp,Ed} \leq \Delta N_{cs,RD}$ ), o corte longitudinal é considerado como esforço de compressão. Neste caso, o esforço transversal resistente é limitado, de acordo com a SCI-P355, por:

$$V_{Rd} = \frac{\left( h_{eff} + h_s - \frac{h_c}{2} \right)}{(h_{eff} + 2e_0)} \left( \frac{2M_{wp,Rd}}{s} + \frac{4M_{bT,NV,Rd}}{l_o} \right) \quad (3.67)$$

### 3.12.2 Esforço Transverso Resistente em Vigas com Aberturas Retangulares

Para aberturas retangulares, o momento fletor de Vierendeel e o momento fletor entre aberturas são mais determinantes, comparativamente às aberturas circulares, na verificação da resistência ao esforço transversal. O esforço transversal resistente, em conexão parcial ( $V_{wp,Ed} > \Delta N_{cs,RD}$ ) é definido na SCI-P355 pela seguinte equação:

$$V_{Rd} = \frac{2M_{wp,Rd}/s + 4 M_{bT,NV,Rd}/l_0}{1 + (2e_0 + h_0)/h_{eff}} + \frac{\Delta N_{cs,Rd}}{s} \left( z_t + h_s - \frac{h_c}{2} \right) \quad (3.68)$$

Em situação de conexão total ( $V_{wp,Ed} \leq \Delta N_{cs,RD}$ ), o esforço transversal resistente é limitado, de acordo com a SCI-P355, por:

$$V_{Rd} = \frac{\left( h_{eff} + h_s - \frac{h_c}{2} \right)}{(h_{eff} + 2e_0 + h_0)} \left( \frac{2M_{wp,Rd}}{s} + \frac{4M_{bT,NV,Rd}}{l_0} \right) \quad (3.69)$$

### 3.12.3 Encurvadura entre Aberturas

Dado que a verificação à encurvadura entre aberturas difere consoante se considerem aberturas afastadas ou adjacentes, o esforço transversal resistente limite só é condicionado pela encurvadura quando existem aberturas adjacentes.

O esforço transversal resistente limite, em conexão parcial, pode ser definido, conforme a SCI-P355, por:

$$V_{Rd} = \frac{N_{wp,Rd}h_0/s + 4 M_{b,NV,Rd}/l_0}{1 + h_{0,eff}/h_{eff}} + \frac{\Delta N_{cs,Rd}}{s} \left( z_t + h_s - \frac{h_c}{2} \right) \quad (3.70)$$

Para conexão total ( $V_{wp,Ed} \leq \Delta N_{cs,RD}$ ), o esforço transversal resistente é limitado, de acordo com a SCI-P355, por:

$$V_{Rd} = \frac{\left( h_{eff} + h_s - \frac{h_c}{2} \right)}{(h_{eff} + 2e_0 + h_0)} \left( \frac{N_{wp,Rd}h_0}{s} + \frac{4M_{bT,NV,Rd}}{l_0} \right) \quad (3.71)$$

### 3.13 Encurvadura Lateral com Torção

Por vezes, em vigas alveoladas, pode admitir-se travamento lateral contínuo na parte superior, devido à laje de betão ou sistemas de cobertura. Não obstante, a metodologia para determinação do estado limite último de encurvadura lateral com torção tem como base as prescrições da norma EN 1993-1-1 para vigas de alma cheia.

Radic *et al.* (2008) apresentam dois diferentes tipos de cálculo do momento crítico de vigas alveoladas, utilizando uma análise numérica baseada em elementos finitos e recorrendo à expressão dada na norma ENV 1993-1-1, considerando a influência das propriedades



geométricas de vigas alveoladas em relação a vigas de alma cheia com as mesmas dimensões da secção transversal. Concluiu-se que as aberturas na alma têm pouca influência no valor do momento crítico de encurvadura lateral com torção. Os momentos críticos obtidos para vigas alveoladas e para as correspondentes vigas de alma cheia são praticamente idênticos.

Também, Gama *et al.* (2010) desenvolveram um modelo numérico para determinar o momento crítico de encurvadura lateral com torção, usando o programa de elementos finitos, ANSYS. Os valores obtidos foram comparados com os valores calculados pela norma ENV 1993-1-1 e com o modelo numérico desenvolvido por Radic *et al.* (2008). Desse modo, foi avaliada e quantificada a influência das propriedades geométricas das vigas alveoladas relativamente às correspondentes vigas de alma cheia.

Como esperado, os momentos críticos para vigas alveoladas utilizando o programa ANSYS foram ligeiramente menores que os das vigas de alma cheia, com diferenças de cerca de 4%. Concluiu-se assim que, para vigas em regime elástico, o momento crítico de encurvadura lateral com torção pode ser calculado da mesma forma do que para vigas de alma cheia, levando em consideração as aberturas na alma.

Na norma EN 1993-1-1, o momento resistente ao estado limite último de encurvadura lateral com torção é definido por:

$$M_{Rk} = \chi_{LT} M_{pL,Rd} \quad (3.72)$$

Onde:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 + \lambda_{LT}^2}} \leq 1; \quad (3.73)$$

$$\phi_{LT} = 0,5[1 - \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2]; \quad (3.74)$$

$\alpha_{LT}$  - fator de imperfeição, idêntico ao referido anteriormente para a encurvadura da alma;

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{EL,Rd}}{M_{cr}}}; \quad (3.75)$$

$M_{cr}$  – momento fletor crítico elástico de encurvadura lateral, considerando as aberturas da viga alveolada.

$M_{EL,Rd}$  – momento fletor elástico resistente

### 3.14 Estados Limite de Utilização

A norma EN 1994-1-1 estabelece a verificação dos estados limite de utilização (deformações, vibrações e fendilhação) de vigas mistas com base em métodos de análise global elástica linear, onde se deve ter em conta os seguintes efeitos:

- Efeito de “*Shear lag*”;
- Fluência e retração do betão;
- Fendilhação do betão;
- Faseamento construtivo;
- Conexão parcial;
- Cedência do aço estrutural e das armaduras.

Calado e Santos (2010), defendem que é conservativo aplicar a mesma largura efetiva usada em estados limite últimos na verificação dos estados limite de utilização, onde o efeito de “*shear lag*” possui menor relevância. O efeito de fluência do betão é levado em conta, de acordo com a EN 1994-1-1, através de uma secção homogeneizada, onde a área de betão corresponde a uma área de aço equivalente para cargas de curta ou longa duração.

Em vigas alveoladas, considera-se um modelo com uma flecha adicional e outro modelo baseado na perda de rigidez de flexão devida à ação de Vierendeel nas aberturas (Lawson e Hicks, 2011).

#### 3.14.1 Estado Limite de Deformação

Em situações práticas, a norma EN 1994 refere que o limite de deformação é muitas vezes verificado pela seguinte relação limite:

$$\delta \leq \frac{L}{250} \quad (3.76)$$

A sequência de construção deve ser tida em conta, em particular para vigas não escoradas na fase de construção, pois nesta situação o perfil metálico sustém o peso próprio dos elementos. Se tal ocorrer, a deformação na fase de construção (secção metálica) deve ser adicionada à deformação na fase de utilização (secção mista), sendo:

$$\delta = \delta_{\text{Secção Metálica}} + \delta_{\text{Secção Mista}} \quad (3.77)$$

Calado e Santos (2010) afirmam que a quantificação da deformação de uma viga mista para uma situação de interação parcial deve considerar o deslizamento entre o perfil de aço e a laje de betão, o qual depende do grau de conexão e do processo construtivo utilizado.

Contudo, de acordo com a norma EN 1994-1-1, os efeitos da interação parcial podem ser ignorados se:

- O dimensionamento dos conectores de corte cumprir a cláusula 6.6 da norma EN 1994-1-1;
- O número de conectores aplicados não for inferior a metade dos necessários para a situação de conexão total, ou as forças que atuam nos conectores de corte em regime elástico não excederem o valor da sua resistência,  $P_{Rd}$ ;
- A altura da laje mista com nervuras transversais ao perfil metálico não ultrapassar 80 mm.

O manual de dimensionamento SCI-P355 propõe duas metodologias alternativas para o cálculo da flecha adicional devida á presença das aberturas. Na primeira metodologia, é calculada uma aproximação do momento de inércia da secção mista, que posteriormente é aplicada ao cálculo das flechas adicionais provocadas pela flexão e pelo esforço transversal, para cargas distribuídas e/ou pontuais.

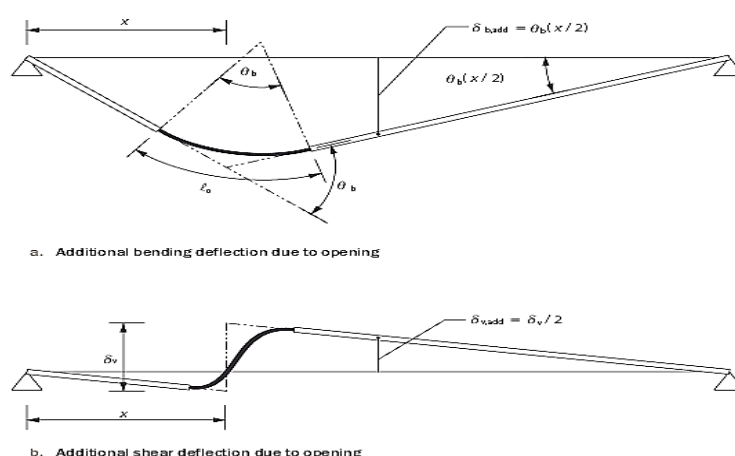


Figura 24 – Deformações numa viga alveolada devidas ao momento fletor e ao esforço transversal (SCI-P355, 2011)

Para uma viga alveolada simplesmente apoiada, sujeita a uma carga pontual a meio vão, a deformação adicional de uma abertura é composta pela soma das deformações devidas ao

momento fletor ( $\delta_{b,add}$ ) e ao esforço transversal ( $\delta_{s,add}$ ) (ver Figura 24), as quais são dadas por, respetivamente:

$$\frac{\delta_{b,add}}{\delta_b} = 12.0 \left(1 - \frac{x}{L}\right) \left[\frac{x}{L}\right]^2 \left(\frac{l_0}{L}\right) \left\{ \frac{E_s I_y}{E_s I_{y,0}} - 1 \right\} \quad (3.78)$$

e

$$\frac{\delta_{s,add}}{\delta_b} = 1.0 \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \left(\frac{l_0}{L}\right)^3 \frac{E_s I_y}{E_s I_{y,T}} \quad (3.79)$$

Onde:

$x$  - posição da abertura em relação ao vão da viga  $L$ ;

$I_y$  - momento de inércia da secção mista;

$I_{y,0}$  - momento de inércia da secção mista na abertura,  $I_{y,0} = I_y - 0.3h h_0^2 t_w$ ; (3.80)

$F_{sd}$  - carga de dimensionamento para estados limite de utilização;

$E_s$  - módulo de elasticidade do aço;

$I_{y,T}$  - momento de inércia do T inferior ou superior;

$\delta_b$  - flecha devida a uma carga pontual unitária aplicada a meio vão, numa viga simplesmente apoiada,

$$\delta_b = \frac{F_{sd} L^3}{48 E_s I_y} \quad (3.81)$$

No caso de uma viga alveolada simplesmente apoiada estar sujeita a uma carga uniformemente distribuída, a deformação adicional de uma abertura é composta pela soma das deformações devidas ao momento fletor ( $\delta_{b,add}$ ) e ao esforço transversal ( $\delta_{s,add}$ ), as quais são dadas por, respetivamente:

$$\frac{\delta_{b,add}}{\delta_b} = 19.2 \left(1 - \frac{x}{L}\right) \left[\frac{x}{L}\right]^2 \left(\frac{l_0}{L}\right) \left\{ \frac{E_s I_y}{E_s I_{y,0}} - 1 \right\} \quad (3.82)$$

e

$$\frac{\delta_{s,add}}{\delta_b} = 1.6 \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \left(\frac{l_0}{L}\right)^3 \frac{E_s I_y}{E_s I_{y,T}} \quad (3.83)$$

Em que  $\delta_b$ , representa a deformação devida a uma carga unitária uniformemente distribuída, considerando o modelo de viga simplesmente apoiada:

$$\delta_b = \frac{5 F_{sd} L^4}{384 E_s I_y} \quad (3.84)$$

Na segunda metodologia, é calculada a flecha adicional por flexão pura devida à perda de rigidez nas aberturas, através de um método empírico. Esta aproximação também é adotada para a parcela do esforço transversal, sendo o valor obtido mais conservativo para aberturas pequenas, onde a deformação devida à ação de Vierendeel é menor. Em aberturas múltiplas, a combinação de efeitos da distribuição de momento fletor e esforço transversal ao longo da viga é representada pelo fator 0.7, sendo a deformação adicional definida na SCI-P355 pela seguinte equação:

$$\frac{\delta_{add}}{\delta_b} = 0,7 n_0 k_0 \left( \frac{l_0}{L} \right) \left( \frac{h_0}{h} \right) \quad (3.85)$$

Em que  $n_0$  é o número de aberturas ao longo da viga.

Geralmente, em vigas alveoladas com aberturas múltiplas, o valor da deformação adicional corresponde entre 12% a 20% da deformação da viga de alma cheia correspondente, com a mesma altura (Lawson e Hicks, 2011).

### 3.14.2 Estado Limite de Largura de Fendas

O estado limite de largura de fendas pode ser verificado com base na norma EN 1992-1-1. Contudo, em vigas mistas, este estado limite pode ser verificado de uma forma simplificada, cumprindo os limites estabelecidos na norma EN 1994-1-1, relativos a áreas mínimas de armadura longitudinal e valores máximos de espaçamento e diâmetro dos varões.

Sobre os apoios das vigas, calculadas como simplesmente apoiadas, deve ser colocada uma armadura mínima de 0,4% ou 0,2% da área de betão (na largura efetiva da laje de betão), caso a viga seja escorada ou não escorada, respetivamente. A armadura deve-se prolongar a partir dos apoios num comprimento mínimo de 0,25 do vão.

Nas restantes secções, deve ser usada uma armadura mínima  $A_{s_{min}}$  (na largura efetiva da laje), definida na cláusula 7.4.2 da norma EN 1994-1-1.

Depois de definida a área de armadura mínima, utilizando os Quadros 7.1 e 7.2 apresentados na norma EN 1994-1-1, é possível efetuar o controlo da fendilhação sem recorrer ao cálculo explícito da largura de fendas. Pode definir-se o espaçamento e o diâmetro dos varões a adotar

para a largura de fendas máximas a considerar (0,2; 0,3 ou 0,4 mm), dispensando-se assim o cálculo da largura de fendas.

### 3.14.3 Estado Limite de Vibração

A norma EN 1990 define que, para se obter um comportamento satisfatório dos edifícios e dos seus elementos estruturais sob a ação de vibrações em condições de serviço, deve ter-se em conta o conforto dos utentes e o funcionamento das estruturas.

Para a verificação de uma estrutura à vibração, pode calcular-se a primeira frequência natural,  $f$ , em função da deformação para uma determinada combinação frequente de ações. No caso de vigas alveoladas, de modo análogo ao efetuado para vigas de alma cheia, basta determinar a flecha  $\delta_v$ , calculada com base na inércia equivalente (Silveira, 2011). A frequência  $f$  pode ser definida com base nesta flecha, recorrendo à expressão:

$$f = \frac{17,8}{\sqrt{\delta_v}} \quad (\text{Hz, para } \delta_v \text{ em mm}) \quad (3.86)$$

Calado e Santos (2010) assumem como mínimos de referência para a frequência natural para vigas mistas os valores indicados no Quadro 7, devendo a frequência própria ser superior a esses valores.

Quadro 7 - Valores mínimos admissíveis de frequências próprias de vigas mistas (Calado e Santos, 2010)

| Tipo de Estrutura                     | Frequência |
|---------------------------------------|------------|
| Edifício de habitação                 | 4 Hz       |
| Ginásio                               | 5 Hz       |
| Passagem pedonal                      | 7 Hz       |
| Escritório e parque de estacionamento | 3 Hz       |

## **4. Caso de Estudo**

### **4.1 Descrição do Problema**

Este capítulo tem como finalidade aplicar as metodologias de dimensionamento descritas nos capítulos anteriores e compará-las com um método de dimensionamento desenvolvido pela empresa ArcelorMittal. A viga alveolada mista a dimensionar está inserida numa laje de um edifício de escritórios, cuja resistência é verificada aos estados limites últimos e de utilização, quer durante a fase de construção quer durante a vida útil da estrutura, ou seja, na fase mista. Considera-se que a laje de betão impede a encurvadura lateral da viga. A viga é simplesmente apoiada com vão de 12 metros, largura de influência de 3 metros, aberturas circulares com diâmetro de 320 *mm* centradas na alma do perfil metálico e está sujeita a uma sobrecarga distribuída de 5,0 *kN/m<sup>2</sup>*.

### **4.2 Dimensões Geométricas e Propriedades dos Materiais**

#### **4.2.1 Dimensões Geométricas**

As propriedades geométricas gerais da viga alveolada, da laje mista e da chapa perfilada são indicadas no Quadro 8:

Quadro 8-Propriedades geométricas

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Vão da viga alveolada   | $L = 12,0 \text{ m}$               |
| Largura de influência da viga alveolada   | $b = 3,0 \text{ m}$                |
| Altura da laje de betão   | $h_s = 140 \text{ mm}$             |
| Altura da chapa perfilada   | $h_p = 60 \text{ mm}$              |
| Altura de betão acima da chapa perfilada  | $h_c = 80 \text{ mm}$              |
| Área da chapa perfilada   | $A_p = 1334 \text{ mm}^2/\text{m}$ |
| Largura da nervura menor  | $b_1 = 60 \text{ mm}$              |
| Largura da nervura maior  | $b_2 = 105 \text{ mm}$             |
| Distância transversal entre nervuras  | $s_{sc,l} = 205 \text{ mm}$        |
| Espessura da chapa perfilada  | $t = 1 \text{ mm}$                 |
| Diâmetro e altura dos conectores de corte do tipo pino com cabeça (2 por nervura) | $d = 19 \text{ mm}$                |
|   | $h_{sc} = 125 \text{ mm}$          |
| Espaçamento transversal entre conectores  | $s_{sc} = 90 \text{ mm}$           |
| Espaçamento longitudinal entre conectores   | $s_{sc,l} = 205 \text{ mm}$        |

O perfil laminado de aço selecionado para ser expandido e fazer parte da viga alveolada é o IPE 450, cujas propriedades se indicam no Quadro 9. Note-se que existem múltiplos procedimentos possíveis para definir as dimensões de uma viga alveolada. Neste caso, em primeiro lugar fixou-se o diâmetro pretendido das aberturas, e depois, com auxílio das equações de pré-dimensionamento, obtiveram-se valores ajustáveis do número de aberturas, da altura da secção em T, da distância entre aberturas e da distância da extremidade da viga metálica à primeira abertura.

Quadro 9-Propriedades do perfil IPE 450 expandido

|                                     |                                |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| Altura final do perfil de aço       | $h = 591,7 \text{ mm}$         |
| Largura dos banzos                  | $b_f = 190 \text{ mm}$         |
| Espessura da alma                   | $t_w = 9,4 \text{ mm}$         |
| Espessura dos banzos                | $t_f = 14,6 \text{ mm}$        |
| Raio de curvatura interno           | $r = 21 \text{ mm}$            |
| Área da secção transversal          | $A = 112,1 \text{ cm}^2$       |
| Momento de inércia segundo o eixo y | $I_y = 63034 \text{ cm}^4$     |
| Módulo plástico de flexão           | $W_{pl,y} = 2449 \text{ cm}^3$ |
| Diâmetro das aberturas              | $d_o = 320 \text{ mm}$         |
| Número de aberturas                 | $n_o = 27$                     |



|   |                          |
|---|--------------------------|
| Distância entre aberturas                                     | $s_o = 110 \text{ mm}$   |
| Distância da extremidade da viga metálica à primeira abertura | $s_e = 250 \text{ mm}$   |
| Altura das secções em T                                       | $h_T = 135,8 \text{ mm}$ |

Seguidamente, verificou-se a admissibilidade das dimensões obtidas (ver Quadro 10).

Quadro 10-Admissibilidade das dimensões da viga alveolada

|   |   |
|---|---|
| Altura máxima da abertura circular  | $d_o \leq 0,8 h \Rightarrow 320 \leq 474,4 \text{ mm}$ (verifica)     |
| Altura mínima da secção em T da viga  | $h_T \geq t_f + 30 \Rightarrow 135,8 \geq 44,6 \text{ mm}$ (verifica) |
| Distância mínima entre aberturas circulares                                   | $s_o \geq 0,3 d_o \Rightarrow 110 \geq 96 \text{ mm}$ (verifica)      |
| Distância mínima da extremidade da viga metálica à primeira abertura circular | $s_e \geq 0,5 d_o \Rightarrow 250 \geq 160 \text{ mm}$ (verifica)     |

A figura seguinte mostra um esboço da viga alveolada mista a dimensionar:

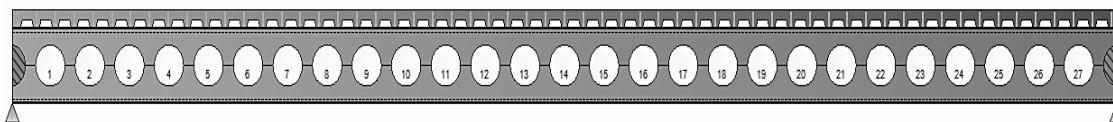


Figura 25 –Esboço da viga alveolada a analisar

## 4.2.2 Propriedades dos Materiais

O quadro seguinte apresenta os valores adotados para as tensões de cedência, tensões últimas e módulos de elasticidade dos materiais da viga.

Quadro 11-Propriedade dos materiais

|                     |   |
|---------------------|---|
| Aço S275            | Tensão de cedência $f_y = 275 \text{ MPa}$            |
|                     | Módulo de elasticidade do aço $E_s = 210 \text{ GPa}$ |
| Conectores de corte | Tensão de cedência $f_y = 350 \text{ MPa}$            |
|                     | Tensão última à tração $f_u = 450 \text{ MPa}$        |
| Betão classe C30/37 | Tensão de compressão $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$        |
|                     | Módulo de elasticidade $E_{cm} = 33 \text{ GPa}$      |
| Chapa perfilada H60 | Tensão de cedência $f_{yp,d} = 320 \text{ MPa}$       |
| Armadura A500       | Tensão de cedência $f_{y,d} = 435 \text{ MPa}$        |

### 4.3 Combinação de Ações

Para o dimensionamento da viga alveolada mista, são consideradas duas combinações de ações distintas para os estados limite últimos e de utilização, com base nas normas EN 1990 e EN 1991. As ações podem ser do tipo permanente ou variável, tanto para fase mista como para a fase de construção. Esta última fase tem como ações permanentes o peso próprio da viga alveolada, da armadura ordinária e da chapa perfilada, e como ações variáveis o peso próprio do betão não endurecido da laje e a sobrecarga de construção. No quadro seguinte estão definidos os valores das ações permanentes e variáveis para a fase mista e fase construtiva.

Quadro 12-Ações permanentes e variáveis

| Ações       |                                 | Fase Mista | Fase de Construção |
|-------------|---------------------------------|------------|--------------------|
| Permanentes | Peso próprio da viga alveolada  | 0,73 kN/m  | 0,73 kN/m          |
|             | Peso próprio da chapa perfilada | 0,30 kN/m  | 0,30 kN/m          |
|             | Peso próprio da laje de betão   | 7,35 kN/m  | -----              |
|             | Peso próprio da armadura        | 0,10 kN/m  | 0,10 kN/m          |
|             | Restante carga permanente       | 4,50 kN/m  | -----              |
| Variáveis   | Sobrecarga                      | 15,00 kN/m | -----              |
|             | Carga de construção             | -----      | 4,50 kN/m          |
|             | Peso próprio do betão húmido    | -----      | 7,65 kN/m          |
| Total       | Ação Permanente $g_k$           | 12,98 kN/m | 1,13 kN/m          |
|             | Ação Variável $q_k$             | 15,00 kN/m | 13,65 kN/m         |

### 4.4 Estados Limite Últimos

O Quadro 13 define as combinações fundamentais para estados limites últimos, sendo que os fatores parciais de segurança para uma combinação fundamental assumem o valor de  $\gamma_G = 1.35$  e  $\gamma_Q = 1.5$ , segundo a norma EN 1990, para ações permanentes e variáveis respetivamente.

Quadro 13-Valores de dimensionamento da combinação fundamental

| Ações           | Fase Mista   | Fase de Construção                                     |
|-----------------|--|--|
| Ação Permanente | $\gamma_G \times g_k = 1,35 \times 12,98 \text{ kN/m}$ | $\gamma_G \times g_k = 1,35 \times 1,13 \text{ kN/m}$  |
| Ação Variável   | $\gamma_G \times q_k = 1,50 \times 15,00 \text{ kN/m}$ | $\gamma_G \times q_k = 1,50 \times 13,65 \text{ kN/m}$ |
| Total           | 40,03 kN/m   | 22,66 kN/m   |

No quadro seguinte apresentam-se os momentos fletores e esforços transversos ao longo da viga simplesmente apoiada para a combinação fundamental nas fases mista e de construção. A verificação da segurança aos estados limite últimos da viga alveolada é efetuada no centro das aberturas 1 e 14. Tal acontece por estas serem as zonas de esforço transverso e momento fletor máximos, respetivamente. É também necessário verificar a secção entre aberturas com esforço transverso máximo, ou seja, entre as aberturas 1 e 2.

Quadro 14-Esforços atuantes na viga alveolada

|   | Posição na viga      | Fase Mista                       | Fase de Construção               |
|---|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Esforço transverso no apoio                 | $x = 0,00 \text{ m}$ | $V_{Ed} = 240,16 \text{ kN}$     | $V_{Ed} = 135,94 \text{ kN}$     |
| Momento fletor no centro da abertura 14     | $x = 5,00 \text{ m}$ | $M_{Ed} = 720,49 \text{ kNm}$    | $M_{Ed} = 407,83 \text{ kNm}$    |
| Esforço transverso no centro da abertura 1  | $x = 0,41 \text{ m}$ | $V_{Ed,o} = 223,75 \text{ kN}$   | $V_{Ed,o} = 126,65 \text{ kN}$   |
| Momento fletor no centro da abertura 1      | $x = 0,41 \text{ m}$ | $M_{Ed,o} = 95,10 \text{ kNm}$   | $M_{Ed,o} = 53,83 \text{ kNm}$   |
| Esforço transverso entre as aberturas 1 e 2 | $x = 0,57 \text{ m}$ | $V_{Ed,1,2} = 217,35 \text{ kN}$ | $V_{Ed,1,2} = 123,79 \text{ kN}$ |

#### 4.4.1 Conexão de Corte

O comportamento misto ocorre após o endurecimento do betão da laje de betão, quando a viga alveolada transmite as tensões de corte longitudinal na interface com o betão. A resistência ao corte de cada conector de corte é dada pelo valor mínimo das seguintes equações:

$$P_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,8 f_u \pi d^2}{4 \gamma_v} \\ \frac{0,29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cn}}}{\gamma_v} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Onde:

$\gamma_v$  - coeficiente parcial de segurança = 1,25;

$h_{sc}$  - altura dos conectores de corte = 125 mm;

$d$  - diâmetro do pino da cabeça dos conectores de corte = 19 mm;

$$\frac{h_{sc}}{d} = 5,26 > 4, \text{ logo } \alpha = 1.$$

Substituindo valores na equação 4.1, obtém-se:

$$P_{Rd} = \min \left\{ \frac{0,8 \times 450 \times 10^{-3} \times \pi \times 19^2}{4 \times 1,25}, \frac{0,29 \times 1 \times 19^2 \times \sqrt{30 \times 33}}{1,25} \right\} = \begin{cases} 81,66 \text{ kN} \\ 83,33 \text{ kN} \end{cases} \rightarrow P_{Rd} = 81,66 \text{ kN} \quad (4.2)$$

Os conectores de corte são aplicados na chapa perfilada, de nervuras perpendiculares ao eixo longitudinal da viga alveolada. Assim a resistência dos conectores é diminuída do seguinte fator:

$$k_t = \frac{0,7b_0}{\sqrt{n_r}h_p} \left( \frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \quad (4.3)$$

Onde:

$n_r$  - número de conectores de corte por nervura = 2;

$b_0$  - largura média das nervuras da chapa perfilada =  $0,5 \times (60 + 105) = 82,5 \text{ mm}$ .

Substituindo valores na equação 4.3, obtém-se:

$$k_t = \frac{0,7 \times 82,5}{\sqrt{2} \times 60} \left( \frac{125}{60} - 1 \right) = 0,74 \quad (4.4)$$

O fator de redução  $k_t$  é limitado por  $k_{t,max} = 0,70$  de acordo com o Quadro 4. Assim, a resistência final dos conectores de corte é dada por:

$$P_{Rd} = 0,70 \times 81,66 = 57,16 \text{ kN} \quad (4.5)$$

Os conectores de corte são distribuídos ao longo de todas as nervuras da viga alveolada. O quadro seguinte mostra a distribuição adotada para os mesmos.

Quadro 15-Distribuição dos conectores de corte

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Conectores entre o centro da abertura 14 e o apoio            | $n_{sc} = 59$                    |
| Conectores entre o centro da abertura 1 e o apoio             | $n_{sc} = 4$                     |
| Conectores acima da abertura 1                                | $n_{sc,o} = 2$                   |
| Conectores entre as aberturas 1 e 2                           | $n_{sc,1-2} = 4$                 |
| Altura mínima dos conectores, segundo a EN 1994-1-1           | $h_{sc} \geq 2d = 38 \text{ mm}$ |
| Espaçamento transversal dos conectores, segundo a EN 1994-1-1 | $s_{sc} > 4d = 72 \text{ mm}$    |

Ao se considerar uma abertura retangular equivalente, o comprimento e altura equivalentes da secção transversal no centro da abertura circular são modificados. No quadro seguinte são indicadas as propriedades geométricas das secções em T, neste caso, os T são simétricos e possuem as mesmas propriedades geométricas.

Quadro 16-Propriedades geométricas da secção em T

|   |  |
|---|--|
| Altura equivalente da abertura retangular                     | $h_{eo} = 0,45 d_o = 0,45 \times 320 = 144 \text{ mm}$ |
| Comprimento equivalente da abertura retangular                | $l_e = 0,9 d_o = 0,9 \times 320 = 288 \text{ mm}$      |
| Altura da secção em T   | $h_T = 135,85 \text{ mm}$                              |
| Altura da alma da secção em T                                 | $d_w = 121,25 \text{ mm}$                              |
| Área da secção em T   | $A_T = 41,01 \text{ cm}^2$                             |
| Área da alma da secção em T                                   | $A_{w,T} = 11,40 \text{ cm}^2$                         |
| Área do banzo da secção em T                                  | $A_{f,T} = 27,74 \text{ cm}^2$                         |
| Posição do eixo neutro elástico, a partir do banzo superior   | $z_{el} = 27,08 \text{ mm}$                            |
| Altura efetiva entre os centros de gravidade das secções em T | $h_{eff} = 537,54 \text{ mm}$                          |

#### 4.4.1.1 Grau de Conexão

A verificação do grau de conexão entre a viga alveolada e a laje de betão é feita na secção transversal a meio vão, que neste caso corresponde à zona da abertura 14, onde o esforço axial resistente das duas secções em T do perfil de aço é definido por:

$$N_{a,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.6)$$

Onde:

$A$  - área da secção transversal do perfil de aço a meio vão, ou seja, a soma das áreas das duas secções em T;

$\gamma_{M0}$  - coeficiente parcial de segurança do aço para estados limite últimos de resistência das secções = 1,0.

Substituindo valores na equação 4.6, obtém-se:

$$N_{a,Rd} = \frac{2 \times 41,01 \times 275 \times 10^{-1}}{1,0} = 2255,28 \text{ kN} \quad (4.7)$$

A capacidade resistente à compressão da laje de betão é delimitada pela largura efetiva do banzo, cujo valor é dado pelo mínimo da seguinte equação:

$$b_{eff} = \min \left\{ \begin{matrix} b \\ \frac{L_e}{4} \end{matrix} \right. \quad (4.8)$$

Onde:

$b$  - espaçamento transversal entre as vigas alveoladas = 3 m;

$L_e$  - comprimento do vão equivalente = 12 m.

Substituindo valores na equação 4.8, obtém-se:

$$b_{eff} = \min \left\{ \begin{matrix} 3 \text{ m} \\ \frac{12}{4} = 3 \text{ m} \end{matrix} \right. \rightarrow b_{eff} = 3000 \text{ mm} \quad (4.9)$$

A capacidade resistente à compressão da laje de betão é determinada através de:

$$N_{c,s,Rd} = \frac{0,85 f_{ck} b_{eff} h_c}{\gamma_c} \quad (4.10)$$

Onde:

$\gamma_c$  - coeficiente parcial de segurança do betão para estados limite últimos = 1,5.

Substituindo valores na equação 5.10, obtém-se:

$$N_{c,s,Rd} = \frac{0,85 \times 30 \times 10^{-3} \times 3000 \times 80}{1,5} = 4080 \text{ kN} \quad (4.11)$$

Como  $N_{c,s,Rd} > N_{a,Rd}$ , o eixo neutro plástico situa-se no banzo de betão. O grau de conexão é definido pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{n P_{Rd}}{N_{c,s,Rd}} = \frac{59 \times 57,16}{4080} = 0,83 \quad (4.12)$$

Para vãos inferiores a 25 metros, o grau de conexão com pares de conectores deve satisfazer a seguinte condição:

$$\eta \geq 1 - \left( \frac{355}{f_y} \right) (0,75 - 0,03L_e) \geq 0,4 \quad (4.13)$$

Substituindo valores na equação 4.13, obtém-se:

$$\eta = 0,83 \geq 1 - \left( \frac{355}{275} \right) (0,75 - 0,03 \times 10) = 0,50 \geq 0,4 \quad (\text{verifica}) \quad (4.14)$$

#### 4.4.2 Classificação da Secção Transversal

O banzo da viga alveolada é de Classe 1 se for verificada a seguinte equação:

$$\frac{c}{t_f} < 9\varepsilon \quad (4.15)$$

Onde:

$$c = \frac{b_f - t_w}{2};$$

$$\varepsilon = 0,92.$$

Substituindo valores na equação 4.15, obtém-se:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{190 - 9,4}{2 \times 14,6} = 6,01 < 9\varepsilon = 9 \times 0,92 = 8,28 \rightarrow \text{Banzo de Classe 1} \quad (4.16)$$

Para classificar a alma da viga alveolada, é necessário definir o comprimento efetivo da abertura circular, o qual é dado por:

$$l_t = 0,7 \times d_o = 0,7 \times 320 = 224,0 \text{ mm} \quad (4.17)$$

A alma da secção em T é de Classe 2 se a seguinte equação for satisfeita:

$$l_t \leq 32\varepsilon t_w \quad (4.18)$$

Substituindo valores na equação 4.18, obtém-se:

$$224,0 < 32 \times 0,92 \times 9,4 = 276,7 \text{ mm} \rightarrow \text{Alma de Classe 2} \quad (4.19)$$

A secção transversal é definida pela classe mais desfavorável do banzo e da alma, sendo pois de Classe 2. Assim, pode ser analisada em regime plástico.

### 4.4.3 Momento Fletor na Abertura

O método de cálculo do momento fletor resistente na zona da abertura consiste no equilíbrio de forças em redor da mesma. Para verificação da segurança à flexão na abertura 14, é indispensável o cálculo dos esforços resistentes de tração no T inferior e de compressão no banzo de betão. O esforço axial resistente no T inferior é dado pela seguinte equação:

$$N_{b,T,Rd} = \frac{A_T f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.20)$$

Substituindo valores na equação 4.20, obtém-se:

$$N_{b,T,Rd} = \frac{41,01 \times 10^2 \times 275 \times 10^{-3}}{1} = 1127,64 \text{ kN} \quad (4.21)$$

O esforço resistente do betão à compressão na sua largura efetiva é dado por:

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{c,s,Rd} \\ n_{sc} P_{Rd} \end{array} \right. \quad (4.22)$$

Substituindo valores na equação 4.22, obtém-se:

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} 4080 \text{ kN} \\ 59 \times 57,16 = 3372,41 \text{ kN} \end{array} \right. \rightarrow N_{c,Rd} = 3372,41 \text{ kN} \quad (4.23)$$

Nesta situação, o eixo neutro plástico encontra-se no banzo de betão, pois  $N_{c,Rd} > N_{b,T,Rd}$ . O momento fletor resistente é obtido por equilíbrio através da seguinte equação:

$$M_{o,Rd} = N_{b,T,Rd} (h_{eff} + z_{el} + h_s - 0,5z_c) \quad (4.24)$$

Onde:

$$z_c - \text{altura de betão comprimido, } z_c = \frac{N_{c,Rd}}{0,85 f_{cd} b_{eff,o}} \leq h_c; \quad (4.25)$$

$$z_c = \frac{3372,41}{0,85 \times \frac{30}{1,5} \times 3000 \times 10^{-3}} = 66,13 \text{ mm} < 80,0 \text{ mm}. \quad (4.26)$$

Substituindo valores na equação 4.24, obtém-se:

$$M_{o,Rd} = 1127,64 \frac{(537,54 + 27,08 + 140 - 0,5 \times 66,13)}{10^3} = 1511,24 \text{ kNm} \quad (4.27)$$

$$M_{o,Rd} = 1511,24 \text{ kNm} > M_{Ed} = 720,49 \text{ kNm} \text{ (verifica)} \quad (4.28)$$



Invertendo a equação de equilíbrio do momento fletor, o esforço axial de tração atuante no T inferior é dado por:

$$N_{b,T,Ed} = \frac{M_{Ed}}{(h_{eff} + z_{el} + h_s - 0,5z_c)} \quad (4.29)$$

Substituindo valores na equação 4.29, obtém-se:

$$N_{b,T,Ed} = \frac{720,49}{(537,54 + 27,08 + 140 - 0,5 \times 66,13)} = 1072,86 \text{ kN} \quad (4.30)$$

$$N_{b,T,Rd} = 1127,64 \text{ kN} > N_{b,T,Ed} = 1072,86 \text{ kN} \text{ (verifica)} \quad (4.31)$$

O mesmo método de cálculo é utilizado para verificar o bom funcionamento da secção mista na abertura 1, ou seja, o esforço de compressão resistente da laje de betão deve ser superior a 40% do esforço de tração atuante no T inferior ( $N_{c,Rd} \geq 0,4 N_{b,T,Ed}$ ). No entanto no centro da abertura 1, o eixo neutro plástico encontra-se na secção de aço e a laje de betão a resiste aos esforços de compressão. O momento fletor resistente do centro na abertura 1 é superior ao atuante durante a fase mista. Para efeitos de verificação da flexão de Vierendeel na abertura 1, importa reter os seguintes valores:  $N_{c,Rd} = 228,64 \text{ kN}$ ;  $M_{o,Rd} = 635,20 \text{ kNm}$  e  $N_{b,T,Ed} = 122,87 \text{ kN}$ .

#### 4.4.4 Armadura Transversal e Armadura de Fendilhação

##### 4.4.4.1 Armadura de Fendilhação

Em vigas mistas, o estado limite de largura de fendas pode ser verificado de uma forma simplificada, cumprindo os limites estabelecidos na norma EN 1994-1-1 relativos a áreas mínimas de armadura longitudinal e espaçamentos e diâmetros máximos dos varões.

Sobre os apoios da viga simplesmente apoiada, deve ser colocada uma armadura mínima de 0,2% da área de betão, para uma viga não escorada. A armadura deve-se prolongar a partir dos apoios, num comprimento mínimo de 0,25 do vão.

A armadura mínima é obtida através da seguinte equação:

$$A_{s,min} = A_{sl} = 0,002 A_c \quad (4.32)$$

Onde:

$A_c$  – área da secção transversal do banzo de betão por metro,  $A_c = h_c b$ .

Substituindo valores na equação 4.32, obtém-se:

$$A_{s,min} = A_{sl} = 0,002 \times 100 \times 8 = 1,60 \text{ cm}^2/m \rightarrow \text{Adoptar } \emptyset 8//0,20 \text{ m} \quad (4.33)$$

A armadura mínima adotada para controle de fendilhação segundo o Quadro 7.1 da EN 1994-1-1 é pois: varões de 8 mm com espaçamento de 0,20 m, perfazendo uma área efetiva de  $2,51 \text{ cm}^2/m$  em cada direção.

#### 4.4.4.2 Armadura Transversal

Na cláusula 6.6.6.2 da norma EN 1994-1-1, é definido o esforço de corte longitudinal resistente do betão, sendo utilizado o método de escoras e tirantes para verificação da segurança da armadura transversal. A verificação, a ser satisfeita em chapas perfiladas com nervuras transversais, é efetuada pela seguinte equação:

$$\frac{A_{sf} f_{yd}}{s_f} + A_p f_{yp,d} \geq \frac{v_{Ed} h_f}{\cot \theta} \quad (4.34)$$

Onde:

$\theta$  - ângulo da escora comprimida com o eixo da viga (ângulo de  $45^\circ$ );

$h_f$  - altura da superfície em rotura do betão =  $h_c$ ;

$v_{Ed}$  - tensão de corte longitudinal na ligação do betão à viga alveolada =  $\frac{P_{Rd}}{s_{sc,l} h_c}$ .

Substituindo valores na equação 4.34, obtém-se:

$$\frac{A_{sf} f_{yd}}{s_f} + A_p f_{yp,d} = 251 \times 435 \times 10^{-3} + 1334 \times 320 \times 10^{-3} = 536,01 \text{ kN} \quad (4.35)$$

$$\frac{v_{Ed} h_f}{\cot \theta} = \frac{57,16 \times 80}{205 \times 80 \times 10^{-3} \times \cot 45^\circ} = 278,83 \text{ kN} \leq 536,01 \text{ kN} \text{ (verifica)} \quad (4.36)$$

O esmagamento das escoras comprimidas no banzo do betão é impedido se a seguinte equação, proposta na EN 1992-1-1, for satisfeita:

$$v_{Ed} \leq v_{0,85} f_{cd} \sin \theta \cos \theta \quad (4.37)$$

Onde:

$\nu$  - coeficiente de redução do betão fendilhado por esforço transversal,  $\nu = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ .

Substituindo valores na equação 4.36, obtém-se:

$$\nu_{Ed} = \frac{56,17 \times 10^3}{205 \times 80} = 3,49 \text{ MPa} \quad (4.38)$$

$$0,6 \left(1 - \frac{30}{250}\right) \times 0,85 \times \frac{30}{1,5} \times \sin 45 \times \cos 45 = 4,49 \text{ MPa} > \nu_{Ed} = 3,49 \text{ MPa} \text{ (verifica)} \quad (4.39)$$

#### 4.4.5 Esforço Transverso

A resistência ao esforço transversal da secção transversal na abertura 1 da viga alveolada é definida pela soma das resistências de corte das secções em T da viga de alveolada e da laje de betão. O esforço transversal resistente plástico das secções em T, para perfil laminados, é dado, de acordo com a EN 1993-1-1, por:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (4.40)$$

Em que a área de corte de cada secção em T,  $A_{v,T}$ , é obtida por:

$$A_{v,T} = (A_T - b_f t_f + (2r + t_w) \times 0,5 t_f) \quad (4.41)$$

Substituindo valores na equação 4.41, obtém-se:

$$A_{v,T} = (4101 - 190 \times 14,6 + (2 \times 21 + 9,4) \times 0,5 \times 14,6) = 1702 \text{ mm}^2 \quad (4.42)$$

O esforço transversal resistente da viga alveolada é dado em função das áreas de corte simétricas das secções em T. Substituindo valores na equação 4.40, obtém-se:

$$V_{b,pl,Rd} = V_{t,pl,Rd} = \frac{1702 \times 275 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \times 1,0} = 270,18 \text{ kN} \quad (4.43)$$

A contribuição da laje de betão para o esforço transversal resistente é definida na EN 1992-1-1, por:

$$V_{c,Rd} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \geq [\nu_{min} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \quad (4.44)$$

Onde:

$$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c = 0,12; \quad (4.45)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{h_c}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{80}} = 2.58 \leq 2 \rightarrow k = 2; \quad (4.46)$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w h_c} = \frac{2,51}{100 \times 8} = 0,0031 \leq 0,02 \rightarrow \rho_l = 0,0031; \quad (4.47)$$

$\sigma_{cp}$  - este fator pode ser dispensado em abertura próximas das extremidades,  $k_1 \sigma_{cp} = 0$ ;

$b_w$  - largura do banzo de betão para a resistência ao esforço transversal =  $b_f + 2h_{s,eff}$ ;

$h_{s,eff}$  - altura de betão para punçoamento =  $0,75h_s$ ;

$d = h_c$ ;

$$v_{min} = 0,035k^{3/2}f_{ck}^{1/2} = 0,035 \times 2^{3/2} \times 30^{1/2} = 0,542 \text{ MPa}. \quad (4.48)$$

Substituindo valores na equação 4.44, obtém-se:

$$V_{c,Rd} = [0,12 \times 2 \times (100 \times 0,0031 \times 30)^{1/3}] (190 + 2 \times 0,75 \times 140) \times 80 \times 10^{-3}$$

$$V_{c,Rd} = 16,22 \text{ kN} \quad (4.49)$$

com um mínimo de:

$$V_{c,Rd} = 0,542 \times (190 + 2 \times 0,75 \times 140) \times 80 \times 10^{-3} = 17,35 \text{ kN} \rightarrow V_{c,Rd} = 17,35 \text{ kN} \quad (4.50)$$

O esforço transversal resistente na secção transversal da abertura 1 é obtido pela soma das resistências das secções em T e da laje de betão, através da seguinte equação:

$$V_{Rd} = V_{b,pl,Rd} + V_{t,pl,Rd} + V_{c,Rd} \quad (4.51)$$

Substituindo valores na equação 4.46, obtém-se:

$$V_{Rd} = 270,18 \times 2 + 17,35 = 557,72 \text{ kN} > V_{Ed,1} = 223,75 \text{ kN} \text{ (verifica)} \quad (4.52)$$

A verificação à encurvadura por esforço transversal pode ser dispensada se a seguinte equação da norma EN 1993-1-5 for satisfeita.

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (4.53)$$

Onde:

$$h_w - \text{Altura da alma do perfil em alma cheia, } h_w = h - 2t_f = 563 \text{ mm}; \quad (4.54)$$

$\eta = 1$ , indicado na EN 1993-1-1.

Substituindo valores na equação 4.53, obtém-se:

$$\frac{563}{9,4} = 59,8 \leq 72 \times \frac{0,92}{1} = 66,2 \quad (\text{verifica}) \quad (4.55)$$

#### 4.4.6 Momento Fletor de Vierendeel

A resistência à flexão de Vierendeel consiste na soma dos momentos flectores locais resistentes dos quatro cantos da abertura com o momento fletor resistente local devido à interação do T superior com a laje de betão. Antes de se proceder ao cálculo do momento fletor resistente de Vierendeel, é necessário atribuir uma distribuição de esforço transversal às secções em T. A percentagem inicialmente admitida é de 50%, ou seja, cada secção em T resiste a 50% do esforço transversal atuante na abertura 1 ( $V_{T,pl,Rd} \geq 0,5V_{Ed}$ ). Esta distribuição de esforço transversal é compatível se satisfazer a seguinte condição:

$$V_{T,pl,Rd} = V_{b,pl,Rd} = V_{t,pl,Rd} \geq 0,5V_{Ed} \quad (4.56)$$

Substituindo valores na equação 4.56, obtém-se:

$$V_{T,pl,Rd} = 223,75 \text{ kN} \geq 0,5 \times 270,18 = 135,09 \text{ kN} \quad (\text{verifica}) \quad (4.57)$$

Caso a condição acima não fosse verificada, seria necessário diminuir a espessura da alma das secções em T, segundo a equação 3.29 apresentada no capítulo 3. Ainda, se o T inferior não verificar a flexão de Vierendeel, é necessário atribuir outra percentagem de distribuição do esforço transversal para as secções em T.

Como a secção transversal é de Classe 2, o momento fletor resistente plástico das secções em T é dado por:

$$M_{pl,Rd} = \frac{A_{w,T}f_y}{\gamma_{M0}} \left( \frac{h_{w,T}}{2} + t_f - z_{pl} \right) + \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} \left( \frac{t_f}{2} - z_{pl} + \frac{z_{pl}^2}{t_f} \right) \quad (4.58)$$

Onde:

$z_{pl}$  - posição do eixo neutro plástico a partir da face exterior do banzo da secção em T =

$$(A_f + A_{w,T})/2 \cdot b_f = (2774 + 1140)/2 \times 190 = 10,29 \text{ mm} \quad (4.59)$$

Substituindo valores na equação 4.58, obtém-se:

$$M_{pl,Rd} = \frac{1140 \times 275 \times 10^{-6}}{1,0} \left( \frac{121,25}{2} + 14,6 - 10,29 \right) + \frac{2774 \times 275 \times 10^{-6}}{1,0} \left( \frac{14,6}{2} - 10,29 + \frac{10,29^2}{14,6} \right) = 23,60 \text{ kNm} \quad (4.60)$$

Contudo, o momento fletor resistente plástico do T inferior é reduzido devido à presença de esforço de tração, tendo-se:

$$M_{bT,NV,Rd} = M_{pl,Rd} \left( 1 - \left( \frac{N_{b,T,Ed}}{N_{b,T,Rd}} \right)^2 \right) \quad (4.61)$$

Substituindo valores na equação 4.61, obtém-se:

$$M_{bT,NV,Rd} = 23,60 \left( 1 - \left( \frac{122,87}{1127,64} \right)^2 \right) = 23,32 \text{ kNm} \quad (4.62)$$

O momento fletor de Vierendeel possui ainda uma componente resistente adicional devida à interação do T superior com a laje de betão através dos conectores de corte. Esta resistência local é definida por:

$$M_{vc,Rd} = k_0 \Delta N_{c,Rd} \left( h_s + z_t - \frac{h_c}{2} \right) \quad (4.63)$$

Onde:

$n_{sc,o}$  - número de conectores de corte existentes acima da abertura 1,  $n_{sc,o} = 2$ ;

$\Delta N_{c,Rd}$  - força de compressão devida aos conectores de corte existentes no comprimento

$$\text{real da abertura } \Delta N_{c,Rd} = n_{sc,o} P_{Rd} = 2 \times 57,16 = 114,32 \text{ KN}; \quad (4.64)$$

$$k_0 - \text{fator de redução de flexibilidade da abertura} = 1 - \frac{d_o}{25h_t} = 1 - \frac{320}{25 \times 121,25}$$

$$= 0,89. \quad (4.65)$$

Substituindo valores na equação 4.63, obtém-se:

$$M_{vc,Rd} = 0,89 \times 114,32 \left( 140 + 27,08 - \frac{80}{2} \right) \times 10^{-3} = 12,99 \text{ kNm} \quad (4.66)$$

Para verificação da flexão de Vierendeel na abertura com maior esforço transversal atuante (abertura 1), deve ser satisfeita a seguinte condição:

$$V_{Ed}l_e \leq 2M_{bT,NV,Rd} + 2M_{tT,NV,Rd} + M_{vc,Rd} \quad (4.67)$$

Onde:

$l_e$  - comprimento equivalente da abertura = 288 mm.

Substituindo valores na equação 4.66, obtém-se:

$$223,75 \times 0,288 = 64,4 \text{ kNm} \leq 2 \times 23,32 + 2 \times 23,60 + 12,99 = 106,9 \text{ kNm} \text{ (verifica)} \quad (4.68)$$

#### 4.4.7 Esforço de Corte Longitudinal entre Aberturas

A secção entre as aberturas 1 e 2 é uma zona crítica em termos de possibilidade de ocorrer a rotura. Assim, há que verificar a sua segurança aos seguintes efeitos: esforço de corte longitudinal, flexão entre aberturas e encurvadura.

O esforço de corte no eixo longitudinal entre aberturas,  $V_{wp,Ed}$ , depende da conexão de corte, a qual pode ser total ou parcial. Como primeira aproximação, é assumido que a conexão de corte entre aberturas é total ( $\Delta N_{cs,Rd} \geq V_{wp,Ed}$ ). O esforço de corte longitudinal atuante pode ser obtido para a situação de conexão total se for satisfeita a seguinte condição:

$$V_{wp,Ed} = \frac{V_{Ed}s}{(h_{eff} + z_t + h_s - 0,5h_c)} \geq \Delta N_{cs,Rd} \quad (4.69)$$

Onde:

$s$  - espaçamento entre centros geométricos das aberturas 1 e 2,

$$s = s_o + d_o = 110 + 320 = 430 \text{ mm}; \quad (4.70)$$

$V_{Ed}$  - esforço transversal atuante na secção entre as aberturas 1 e 2,  $V_{Ed} = 217,35 \text{ kN}$ ;

$n_{sc,1,2}$  - número de conectores entre a abertura 1 e 2,  $n_{sc,1,2} = 4$ ;

$\Delta N_{cs,Rd}$  - incremento da força de compressão mobilizada na laje de betão por intermédio dos conectores de corte =  $n_{sc,1,2}P_{Rd}$ .

Substituindo valores na equação 4.69, obtém-se:

$$\frac{217,35 \times 430}{(537,54 + 27,08 + 140 - 0,5 \times 80)} = 140,62 \text{ kN} \leq 4 \times 57,16 = 228,64 \text{ kN} \text{ (verifica)}$$

$$(4.71)$$

O esforço de corte longitudinal resistente é dado por:

$$V_{wp,Rd} = \frac{s_o t_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (4.72)$$

Substituindo valores na equação 4.72, obtém-se:

$$V_{wp,Rd} = \frac{110 \times 9,4 \times 275 \times 10^{-3}}{1,0 \times \sqrt{3}} = 164,2 \text{ kN} \geq V_{wp,Ed} = 140,6 \text{ kN} \text{ (verifica)} \quad (4.73)$$

#### 4.4.8 Momento Fletor entre Aberturas

A verificação da segurança ao momento fletor atuante a meia altura entre aberturas, não assume relevância desde que as aberturas estejam centradas na alma da viga alveolada ( $M_{wp,Ed} = 0$ ). Contudo, apesar de não ter relevância, o momento fletor resistente elástico é definido por:

$$M_{wp,Rd} = \frac{s_o^2 t_w f_y}{6} \quad (4.74)$$

Substituindo valores na equação 4.74, obtém-se:

$$M_{wp,Rd} = \frac{110^2 \times 9,4 \times 275 \times 10^6}{6} = 5,21 \text{ kNm} > M_{wp,Ed} = 0 \text{ kNm} \text{ (verifica)} \quad (4.75)$$

#### 4.4.9 Encurvadura entre Aberturas

A verificação da resistência à encurvadura é distinta para aberturas adjacentes e aberturas afastadas. Neste caso de estudo, as aberturas são consideradas adjacentes, visto o seu espaçamento ser menor que o comprimento das mesmas ( $s_o \leq d_o$ ). Neste tipo de aberturas, e quando o momento fletor entre aberturas é nulo, a ação do esforço de corte longitudinal a meia altura da secção entre aberturas é assumida igual ao esforço de compressão atuante, ou seja,  $N_{wp,Ed} = V_{wp,Ed} = 140,62 \text{ kN}$ .



O coeficiente de redução de encurvadura  $\chi$  é definido na norma EN 1993-1-1, sendo a esbelteza normalizada calculada de acordo com os comprimentos de encurvadura de cada tipo de abertura. Obtêm-se assim as seguintes esbeltezas normalizadas para aberturas circulares:

$$\bar{\lambda} = \frac{1,75\sqrt{s_0^2 + h_o^2}}{t_w \lambda_1} \quad (4.76)$$

Onde:

$$\lambda_1 = 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \sqrt{\frac{235}{275}} = 86,80. \quad (4.77)$$

Substituindo valores na equação 4.76 obtém-se:

$$\bar{\lambda} = \frac{1,75\sqrt{110^2 + 320^2}}{9,4 \times 74,4} = 0,726 \quad (4.78)$$

A viga alveolada resulta da expansão da alma de um perfil laminado, pelo que se adota a curva de encurvadura  $b$  para perfis laminados a quente, à qual corresponde um fator de imperfeição  $\alpha = 0,34$ . O coeficiente de redução relativo à encurvadura por flexão,  $\Phi$ , é definido por:

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (4.79)$$

Substituindo valores na equação 4.79, obtém-se:

$$\Phi = 0,5[1 + 0,34(0,726 - 0,2) + 0,726^2] = 0,853 \quad (4.80)$$

Por último, o coeficiente de redução de encurvadura é dado por:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + (\Phi^2 - \bar{\lambda}^2)^{0,5}} \quad (4.81)$$

Substituindo valores na equação 4.81, obtém-se:

$$\chi = \frac{1}{0,853 + (0,853^2 - 0,726^2)^{0,5}} = 0,769 \quad (4.82)$$

Logo, a resistência à encurvadura em aberturas adjacentes é dada por:

$$N_{wp,Rd} = \chi \frac{s_o t_w f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.83)$$

Onde:

$\gamma_{M1}$  - coeficiente parcial de segurança para a resistência de elementos comprimidos = 1,0.

Substituindo valores na equação 4.83, obtém-se:

$$N_{wp,Rd} = 0,769 \frac{110 \times 9,4 \times 275 \times 10^{-3}}{1,0} = 218,66 \text{ kN} > N_{wp,Ed} = 140,62 \text{ kN} \text{ (verifica)} \quad (4.84)$$

#### 4.4.10 Limitação do Esforço Transverso

Além das verificações necessárias na secção entre aberturas, devem ser observadas limitações do esforço transverso em relação às situações de flexão e encurvadura. As restrições são verificadas com base no tipo de conexão de corte admitida na definição do esforço de corte longitudinal  $V_{wp,Ed}$ . Deste modo, o esforço transverso resistente condicionado pela flexão para aberturas circulares em situação de conexão total é obtido por:

$$V_{Rd} = \frac{\left(h_{eff} + h_s - \frac{h_c}{2}\right)}{(h_{eff} + 2e_0)} \left(\frac{2M_{wp,Rd}}{s} + \frac{4M_{bT,NV,Rd}}{l_0}\right) \quad (4.85)$$

Onde:

$e_0$  - excentricidade do centro geométrico da abertura relativamente ao centro geométrico da viga alveolada = 0;

$l_0 = d_o$ .

Substituindo valores na equação 4.85, obtém-se:

$$V_{Rd} = \frac{10^3 \left(537,54 + 140 - \frac{80}{2}\right)}{(537,54 + 0)} \left(\frac{2 \times 5,21}{430} + \frac{4 \times 23,32}{320}\right) = 374,54 \text{ kN} \quad (4.86)$$

$$V_{Rd} = 374,54 \text{ kN} > V_{Ed} = 223,75 \text{ kN} \text{ (verifica)}$$

Por último, o esforço transverso resistente condicionado pela encurvadura para aberturas circulares em situação de conexão total é dado por:

$$V_{Rd} = \frac{\left(h_{eff} + h_s - \frac{h_c}{2}\right)}{\left(h_{eff} + 2e_0 + h_0\right)} \left(\frac{N_{wp,Rd}h_0}{s} + \frac{4M_{bT,NV,Rd}}{l_0}\right) \quad (4.87)$$

Onde:

$$h_0 = d_0.$$

Substituindo valores na equação 4.87, obtém-se:

$$V_{Rd} = \frac{10^3 \left(537,54 + 140 - \frac{80}{2}\right)}{(537,54 + 0 + 320)} \left(\frac{164,17 \times 320}{450} + \frac{4 \times 23,32}{320}\right) = 337,73 \text{ kN} \quad (4.88)$$

$$V_{Rd} = 337,73 \text{ kN} > V_{Ed} = 223,75 \text{ kN} \text{ (verifica)}$$

#### 4.4.11 Faseamento Construtivo

Para o faseamento construtivo, as verificações anteriores são novamente efetuadas, mas tendo em conta apenas a viga alveolada, em que a contribuição da laje de betão não é tida em conta.

O momento fletor resistente plástico sem a presença de aberturas é definido por:

$$M_{Rd} = \frac{W_{pl,y}f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.89)$$

Substituindo valores na equação 4.89, obtém-se:

$$M_{Rd} = \frac{2449 \times 275 \times 10^{-3}}{1,0} = 673,48 \text{ kNm} > M_{Ed} = 407,83 \text{ kNm} \text{ (verifica)} \quad (4.90)$$

O momento fletor resistente é diminuído na presença de uma abertura, de acordo com:

$$M_{o,Rd} = M_{Rd} - \frac{t_w d_o^2 f_y}{6} \quad (4.91)$$

Substituindo valores na equação 4.91, obtém-se:

$$M_{o,Rd} = 673,48 - \frac{9,4 \times 320^2 \times 275 \times 10^{-6}}{6} = 629,36 \text{ kNm} \quad (4.92)$$

$$M_{o,Rd} = 629,36 \text{ kNm} > M_{Ed} = 407,83 \text{ kNm} \text{ (verifica)}$$

Assumindo que o esforço de tração resistente do T inferior da viga alveolada  $N_{b,T,Rd} = 1127,64 \text{ kN}$  é igual ao esforço de compressão resistente no T superior nas aberturas 1 e 14, o esforço de tração atuante no T inferior das aberturas 1 e 14 é obtido por equilíbrio de forças a partir das seguintes equações:

Abertura 14:

$$N_{b,T,Ed} = \frac{M_{o,Ed}}{h_{eff}} = \frac{407,83}{537,54} = 758,70 \text{ kN} < N_{b,T,Rd} = 1127,64 \text{ kN} \quad (\text{verifica}) \quad (4.93)$$

Abertura 1:

$$N_{b,T,Ed} = \frac{M_{o,Ed}}{h_{eff}} = \frac{53,83}{537,54} = 100,15 \text{ kN} < N_{b,T,Rd} = 1127,64 \text{ kN} \quad (\text{verifica}) \quad (4.94)$$

A redução da resistência do momento fletor da abertura 1 na presença de esforço de tração no T inferior é indicada na seguinte equação, onde:

$$M_{bT,NV,Rd} = M_{pl,Rd} \left( 1 - \left( \frac{N_{b,T,Ed}}{N_{b,T,Rd}} \right)^2 \right) \quad (4.95)$$

Onde:

$M_{pl,Rd}$  – momento fletor plástico resistente de Vierendeel dos cantos da abertura,  $M_{pl,Rd} = 23,60 \text{ kNm}$ .

Substituindo valores na equação 4.95, obtém-se:

$$M_{bT,NV,Rd} = 23,60 \left( 1 - \left( \frac{100,15}{1127,64} \right)^2 \right) = 23,42 \text{ kNm} \quad (4.96)$$

No faseamento construtivo é verificada a flexão de Vierendeel na abertura 1, na abertura com maior esforço transversal atuante, se a seguinte condição for satisfeita:

$$V_{Ed} l_e \leq 4 M_{bT,NV,Rd} \quad (4.97)$$

Substituindo valores na equação 4.97, obtém-se:

$$126,65 \times 0,288 = 36,78 \text{ kNm} \leq 4 \times 23,42 = 93,67 \text{ kNm} \quad (\text{verifica}) \quad (4.98)$$

Na verificação da segurança da secção entre aberturas no faseamento construtivo, pode-se admitir que, uma vez verificada para a fase de utilização também verifica para a fase mista, ou seja, durante a vida útil da estrutura.

## 4.5 Estados Limite de Utilização

O Quadro 16 define as ações para estados limites de utilização numa construção não escorada, sendo que os fatores parciais de segurança para combinação característica, assumem o valor de  $\gamma_G = 1.00$  e  $\gamma_Q = 1.00$  no Quadro 17, segundo a norma EN 1990, para ações permanentes e variáveis, respetivamente.

Quadro 17-Ações permanentes e variáveis

| Ações       |                                 | Secção de Aço | Secção Mista |
|-------------|---------------------------------|---------------|--------------|
| Permanentes | Peso próprio da viga alveolada  | 0,73 kN/m     | -----        |
|             | Peso próprio da chapa perfilada | 0,30 kN/m     | -----        |
|             | Peso próprio do betão húmido    | 8,09 kN/m     | -----        |
|             | Peso próprio da armadura        | 0,10 kN/m     | -----        |
|             | Restante carga permanente       | -----         | 4,50 kN/m    |
| Variáveis   | Sobrecarga                      | -----         | 15,00 kN/m   |
| Total       | Ação Permanente $g_k$           | 9,22 kN/m     | -----        |
|             | Ação Variável $q_k$             | -----         | 19,50 kN/m   |

Quadro 18-Valor de cálculo da combinação característica

| Ações           | Secção de Aço   | Secção Mista   |
|-----------------|---|--|
| Ação Permanente | $\gamma_G \times g_k = 1,00 \times 9,22 \text{ kN/m}$ | -----  |
| Ação Variável   | -----   | $\gamma_G \times q_k = 1,00 \times 19,50 \text{ kN/m}$ |
| Total           | 9,22 KN/m   | 19,50 KN/m   |

### 4.5.1 Deformação

A sequência de construção é uma questão relevante no cálculo da deformação, nomeadamente quando as vigas não são escoradas durante a construção. Nesta situação, o perfil metálico sustém o peso próprio dos elementos até ao endurecimento do betão. Deste modo, a deformação total da viga alveolada mista é constituída pelas seguintes deformações:

faseamento construtivo (secção de aço), fase mista (secção mista) e deformação adicional devida à presença das aberturas na viga.

$$\delta_{Total} = \delta_b + \delta_c + \delta_{add} \quad (4.99)$$

A deformação limite imposta à estrutura é estabelecida de acordo com o tipo de projeto e acordada com o dono de obra. Neste caso de estudo, o limite é de  $L/250$ .

Para definir a deformação da secção de aço  $\delta_b$ , são apenas consideradas as cargas permanentes para o cálculo da flecha da viga a meio vão. A flecha é calculada através da seguinte equação:

$$\delta_b = \frac{5g_k L^4}{384E_a I_y} \quad (4.100)$$

Onde:

$g_k$  - carga permanente da combinação característica,  $g_k = 9,22 \text{ kN/m}$ ;

$E_a$  - módulo de elasticidade do aço,  $E_a = 210 \text{ GPa}$ ;

$I_y$  - momento de inércia da viga de alveolada (alma cheia) segundo o eixo y,

$$I_y = 63034 \text{ cm}^4.$$

Substituindo valores na equação 4.100, obtém-se:

$$\delta_b = \frac{5 \times 9,22 \times 12^4 \times 10^5}{384 \times 210 \times 63034} = 18,80 \text{ mm} \rightarrow L/638 \quad (4.101)$$

A deformação para a secção mista,  $\delta_c$ , tem em conta a homogeneização das secções de aço e de betão. O coeficiente de homogeneização segundo a EN 1994-1-1, para carregamentos de curta e longa duração, é definido por:

$$n = \frac{E_a}{0,5E_{cm}} \quad (4.102)$$

Substituindo valores na equação 4.102, obtém-se:

$$n = \frac{210}{0,5 \times 33} = 12,73 \quad (4.103)$$

O momento de inércia da secção mista é expresso por:

$$I_{y,c} = \frac{A(h + h_s + h_p)^2}{4(1 + nr)} + \frac{b_{eff}h_c^3}{12n} + I_y \quad (4.104)$$

Onde:

$$r = \frac{A}{b_{eff}h_c} = \frac{112,09 \times 10^2}{3000 \times 80} = 0,0467; \quad (4.105)$$

Substituindo valores na equação 4.104, obtém-se:

$$I_{y,c} = \frac{112,09 \times 10^2 (591,7 + 140 + 60)^2}{4(1 + 12,73 \times 0,0467)} + \frac{3000 \times 80^3}{12 \times 12,73} + 63034 \times 10^4 \quad (4.104)$$

$$I_{y,c} = 173194 \text{ cm}^4 \gg I_y = 63\,034 \text{ cm}^4$$

A flecha para secção mista é definida na seguinte equação por:

$$\delta_c = \frac{5q_k L^4}{384 E_a I_{y,c}} \quad (4.107)$$

Onde:

$q_k$  - carga variável da combinação característica,  $q_k = 19,50 \text{ kN/m}$ ;

Substituindo valores na equação 4.107, obtém-se:

$$\delta_c = \frac{5 \times 19,50 \times 12^4 \times 10^5}{384 \times 210 \times 173194} = 14,48 \text{ mm} \rightarrow L/829 \quad (4.108)$$

A deformação da viga alveolada mista na presença de múltiplas aberturas ( $\delta_{add}$ ) na viga alveolada é expressa na seguinte equação:

$$\frac{\delta_{add}}{\delta_b + \delta_c} = 0,7 n_o k_o \left( \frac{l_o}{L} \right) \left( \frac{h_o}{h} \right) \quad (4.109)$$

Onde:

$n_o$  – número de aberturas da viga alveolada,  $n_o = 27$ ;

$l_o$  - comprimento equivalente das aberturas circulares,  $l_o = 0.45 d_o$ ;

$h_o$  - altura das aberturas circulares,  $h_o = d_o$ ;

$h$  - altura da viga alveolada;

$k_o$  – este coeficiente é indicado no seguinte quadro:

Quadro 19-Coeficiente  $k_o$  para aberturas com e sem reforços longitudinais

| Tipo de Viga       | Aberturas com reforços | Aberturas sem reforços |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| Alveolada metálica | 1,0                    | 1,5                    |
| Alveolada mista    | 1,5                    | 2,0                    |

Substituindo valores na equação 4.109, obtém-se:

$$\delta_{add} = 0,7 \times 27 \times 1,5 \left( \frac{0,45 \times 320}{12000} \right) \left( \frac{320}{591,7} \right) (17,80 + 14,47) = 6,12 \text{ mm} \quad (4.110)$$

O efeito da presença das aberturas em relação à deformada da viga mista é de  $6,12/(17,8 + 14,47 + 6,12) \times 100 = 15,5\%$ .

Finalmente, a deformação total da viga alveolada mista  $\delta_{Total}$ , é expressa na equação 4.99, onde:

$$\delta_{Total} = 17,80 + 14,47 + 6,12 = 39,40 \text{ mm} \rightarrow \frac{L}{305} < \frac{L}{250} = 48 \text{ mm} \text{ (verifica)} \quad (4.111)$$

## 4.5.2 Vibração

As vibrações da estrutura devem ser limitadas de forma a evitar desconforto significativo para os utilizadores da estrutura, restringindo as suas funcionalidades. Para evitar tal inconveniente, a viga deve verificar o estado limite de utilização de vibração, onde a frequência natural para vibrações tem de ser superior ao mínimo admissível de  $3H_z$ , indicado no Quadro 7 para edifícios de escritórios. Neste estado limite é utilizada a combinação frequente, onde  $\psi_1 = 0,5$  para edifícios de categoria B, ou seja, zona de escritórios. No Quadro 20 são indicadas as ações admitidas para este estado limite.

Quadro 20-Ações para combinação frequente

|             |                                 |            |
|-------------|---------------------------------|------------|
| Permanentes | Peso próprio da viga alveolada  | 0,73 kN/m  |
|             | Peso próprio da chapa perfilada | 0,30 kN/m  |
|             | Peso próprio da laje de betão   | 7,35 kN/m  |
|             | Peso próprio da armadura        | 0,10 kN/m  |
|             | Restante carga permanente       | 4,50 kN/m  |
| Variáveis   | Sobrecarga                      | 15,00 kN/m |



|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| <b>Total</b> | <b>Ação Permanente <math>g_k</math></b>     | 12,98 kN/m |
|              | <b>Ação Variável <math>q_k\psi_1</math></b> | 7,50 kN/m  |

De acordo com a norma SCI-354:Design of Floors for Vibration: A New Approach do Steel Construction Institute (Smith et al., 2009), estabelece que o cálculo da frequência natural deve baseado no módulo de elasticidade dinâmica do betão  $E_{c,dyn}$ , este assume para betão normal o valor de 38 GPa e 22 GPa para betão leve. Deste modo, o coeficiente de homogeneização e o momento de inércia da secção mista são modificados. O novo coeficiente de homogeneização é dado por:

$$n = \frac{E_a}{E_{c,dyn}} = \frac{210}{38} = 5,53 \quad (4.112)$$

Consequentemente, o novo momento de inércia da secção mista é dada pela substituição na equação 4.104, onde:

$$I_{y,c} = \frac{112,09 \times 10^2 (591,7 + 140 + 60)^2}{4(1 + 5,53 \times 0,0467)} + \frac{3000 \times 80^3}{12 \times 5,53} + 63034 \times 10^4 \quad (4.113)$$

$$I_{y,c} = 202642 \text{ cm}^4$$

O efeito da deformação das aberturas assume 15,5% em relação à deformada total da secção mista, assim, o momento de inércia da secção mista é reduzido em função deste efeito das aberturas. O momento de inércia reduzido é dado por:

$$I_{y,c} = \frac{100 - 15,5}{100} \times 202642 = 171153 \text{ cm}^4 \quad (4.114)$$

A deformação deste estado limite de vibração é definida pela flecha de uma viga simplesmente apoiada, onde:

$$\delta_v = \frac{5(g_k + q_k)L^4}{384E_a I_{y,c}} \quad (4.115)$$

Substituindo valores na equação, obtém-se:

$$\delta_v = \frac{5(12,98 + 7,5) \times 12^4 \times 10^5}{384 \times 210 \times 171153} = 15,39 \text{ mm} \quad (4.116)$$

Finalmente, a frequência natural da viga alveolada mista é expressa na seguinte equação, onde:

$$f = \frac{17,8}{\sqrt{\delta_v}} = \frac{17,8}{\sqrt{15,39}} = 4,54 \text{ Hz} \geq 3H_z \text{ (verifica)} \quad (4.117)$$

## 4.6 Comparação de Resultados

Para facilitar a comparação entre os resultados obtidos a partir da norma SCI-P355 com o programa de cálculo da empresa ArcelorMittal, foi desenvolvida uma folha de cálculo automático em Excel para dimensionamento para vigas alveoladas com aberturas circulares ou retangulares. Com esta folha de cálculo, é possível conhecer os parâmetros críticos para o dimensionamento da viga alveolada e ajustar se necessário o carregamento, os materiais, a geometria da viga e das aberturas, a posição das aberturas na alma e a eventual existência de escoramento, despendendo assim menos tempo que seria gasto no cálculo manual.

Tanto na folha de cálculo como no programa da ArcelorMittal, a viga alveolada e a laje mista têm as mesmas características geométricas, os mesmos materiais e o mesmo carregamento indicados no início deste Capítulo.

Os resultados obtidos com o programa da ArcelorMittal são apresentados nas Figuras 26 e 27. A Figura 26 mostra o grau de conexão de corte e a verificação das relações entre esforços atuantes e capacidade resistente da viga para os estados limite últimos. Na Figura 27 são apresentadas as verificações para os estados limite de utilização, nomeadamente a deformação da estrutura na fase de construção e na fase mista, assim como a frequência natural com vários níveis de sobrecarga ( $\psi_{1,1}$ ).

### Degree of connection

Minimal degree of connection = 0,497

Most unfavorable degree of connection (Comb. U1) : = 1,52 > 0,497 Satisfactory

S = Satisfactory NS = Not satisfactory

### Checkings of net sections at openings

|  |                    |         |     |   |
|--|--------------------|---------|-----|---|
| Resistance to bending moment (Open. no 1 - Comb. U1) :     | $\Gamma_{M,max}$   | = 0,388 | < 1 | S |
| Resistance to normal force (Open. no 14 - Comb. U1) :      | $\Gamma_{N,max}$   | = 0,774 | < 1 | S |
| Resistance to shear force (Open. no 11 - Comb. U1) :       | $\Gamma_{V,max}$   | = 0,603 | < 1 | S |
| Resistance to M+N interaction (Open. no 14 - Comb. U1) :   | $\Gamma_{MN,max}$  | = 0,774 | < 1 | S |
| Resistance to N+V interaction (Open. no 14 - Comb. U1) :   | $\Gamma_{NV,max}$  | = 0,774 | < 1 | S |
| Resistance to M+V interaction (Open. no 1 - Comb. U1) :    | $\Gamma_{MV,max}$  | = 0,388 | < 1 | S |
| Resistance to M+N+V interaction (Open. no 14 - Comb. U1) : | $\Gamma_{MNV,max}$ | = 0,774 | < 1 | S |

### Web checkings

|   |                    |         |     |   |
|---|--------------------|---------|-----|---|
| Shear buckling check required (Post no 26 - Comb. U1) : | $\Gamma_{Vbw,max}$ | = 0,232 | < 1 | S |
|---|--------------------|---------|-----|---|

### Posts checkings

|   |                   |           |     |   |
|---|-------------------|-----------|-----|---|
| Resistance to shear (Post no 26 - Comb. U1) :                                 | $\Gamma_{Vh,max}$ | = 0,838   | < 1 | S |
| Resistance to buckling (Post no 26 - Comb. U1) :                              | $\Gamma_{b,max}$  | = 0,708   | < 1 | S |
| Minimum throat thickness (Post no 26 - Comb. U1) :                            | $a_{min}$         | = 2,81 mm |     |   |
| Warning : the throat thickness of the fillet weld must be at least 3 mm (EC3) |                   |           |     |   |

### Gross sections checkings

|   |                   |                    |     |   |
|---|-------------------|--------------------|-----|---|
| Resistance to bending (Post no 13 - Comb. U1) : | $\Gamma_{Mg,max}$ | = 0,577 (Classe 1) | < 1 | S |
| Resistance to shear (Right end - Comb. U1) :    | $\Gamma_{Vq,max}$ | = 0,237            | < 1 | S |

Figura 26- Resultados do programa da ArcelorMittal para estados limite últimos: grau de conexão e relação dos esforços atuantes com a capacidade resistente

### Under elementary load cases

|   |                              |            |
|---|------------------------------|------------|
| Permanent loads except self weight (G*) :                 | $v = 5,87 \text{ mm (S29)}$  | = L / 2045 |
| Self weight (steel beam under pouring of concrete) :      | $v = 19,03 \text{ mm}$       | = L / 631  |
| Note: the concrete is assumed to have a constant depth    |                              |            |
| Live loads 1 (Q1) :                                       | $v = 14,90 \text{ mm (S29)}$ | = L / 806  |
| Deflection due to shrinkage of concrete (M = 147,5 kNm) : | $v = 9,32 \text{ mm}$        | = L / 1288 |

### Under SLS Combinations (composite stage)

|                         |                             |           |
|-------------------------|-----------------------------|-----------|
| S1 = 1,00 G + 1,00 Q1 : | $v = 20,8 \text{ mm (S29)}$ | = L / 578 |
|-------------------------|-----------------------------|-----------|

The user has to check whether the deflections are acceptable according to the project requirements and to consider a precambering if necessary.

### Natural frequencies

| Load case / Combination | Mass assumed to be concentrated | Mass assumed to be distributed |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| G                       | 4,03Hz                          | 4,59Hz                         |
| G + 0,1 Q1              | 3,85Hz                          | 4,38Hz                         |
| G + 0,2 Q1              | 3,69Hz                          | 4,20Hz                         |
| G + 0,3 Q1              | 3,55Hz                          | 4,04Hz                         |
| G + 0,4 Q1              | 3,42Hz                          | 3,90Hz                         |
| G + 0,5 Q1              | 3,31Hz                          | 3,77Hz                         |

Figura 27- Resultados do programa da ArcelorMittal para estados limite de utilização: deformação da viga alveolada mista e frequências naturais da estrutura

No Quadro 21 apresentam-se os resultados obtidos com a folha de cálculo desenvolvida neste trabalho, com base nas indicações da SCI-P355 e da ENV 1993-1-1, Annex N. Em anexo, é possível consultar a folha de cálculo completa.

Quadro 21-Grau de conexão, relação dos esforços atuantes com a capacidade resistente, deformada da estrutura e frequência natural

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Grau mínimo de conexão de corte                                       | $\eta = 0,827 \geq 0,497$           |
| <b>Estados Limite Últimos</b>   |                                     |
| Momento fletor global na abertura 14                                  | 0,477 < 1                           |
| Esforço axial do T inferior na abertura 14                            | 0,951 < 1                           |
| Esforço de corte longitudinal do betão                                | 0,520 < 1                           |
| Esmagamento das escoras comprimidas do banzo de betão                 | 0,777 < 1                           |
| Esforço transversal   | 0,401 < 1                           |
| Momento fletor de Vierendeel na abertura 1                            | 0,603 < 1                           |
| Esforço de corte longitudinal entre aberturas                         | 0,857 < 1                           |
| Encurvatura da alma na secção entre aberturas                         | 0,643 < 1                           |
| Esforço transversal por encurvatura ou flexão da alma entre aberturas | 0,663 < 1                           |
| Momento fletor resistente durante a fase de construção                | 0,648 < 1                           |
| Esforço axial no T inferior durante a fase de construção              | 0,673 < 1                           |
| Momento fletor de Vierendeel durante a fase de construção             | 0,389 < 1                           |
| <b>Estados Limite de Utilização</b>                                   |                                     |
| Deformação em fase de construção (Secção de Aço)                      | $\delta_b = 18,80 \text{ mm}$       |
| Deformação em fase mista (Secção Mista)                               | $\delta_c = 14,48 \text{ mm}$       |
| Deformação adicional devida à presença de aberturas                   | $\delta_{add} = 6,12 \text{ mm}$    |
| Deformação total da viga alveolada                                    | $\delta_{Total} = 39,40 \text{ mm}$ |
| Vibração  | $f = 4,54 \text{ Hz}$               |

Observa-se que, nos dois métodos, o grau de conexão é superior a 80%. Contudo, segundo a EN 1994-1-1, este grau é limitado pelo máximo de 70% para a situação em que são aplicados dois conectores de corte por nervuras e a em que a direção das nervuras é perpendicular à viga alveolada.

Para os estados limite últimos, a principal diferença entre os dois métodos reside na resistência ao esforço axial no T inferior da Abertura 14, que é 22% superior no programa da ArcelorMittal relativamente ao valor indicado na folha de cálculo. Outro parâmetro importante que limita o dimensionamento em ambos os métodos é a resistência ao esforço transversal

conjugada com flexão e encurvadura na secção entre aberturas, cujo valor é semelhante nos dois métodos. Quando este parâmetro se aproxima de 50%, a espessura da alma é diminuída, reduzindo assim a sua capacidade resistente ao esforço transversal.

Em relação aos estados limites de utilização, os valores da flecha da viga mista no programa da ArcelorMittal e na folha de cálculo são praticamente idênticos. No programa da ArcelorMittal, essa flecha é dada pela seguinte soma:  $\delta = 5,87 + 19,03 + 14,90 = 39,80 \text{ mm}$ . No mesmo programa, também é fornecida a deformação devida à retração da laje de betão, a qual é igual a  $9,32 \text{ mm}$ . Por fim, a frequência natural em ambos os métodos é superior ao mínimo admissível de  $3 \text{ Hz}$ .



## **5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros**

No presente capítulo são abordadas as principais conclusões retiradas do trabalho realizado, propondo-se ainda possíveis desenvolvimentos futuros relativamente aos tópicos analisados.

### **5.1 Conclusões**

Nesta dissertação, procedeu-se à exposição e caracterização estrutural de vigas alveoladas. Nesse sentido, foram apresentados os modelos de vigas alveoladas mais usuais, tendo sido referidos os modos de rotura, as vantagens, as desvantagens e as condições de utilização deste tipo de vigas.

Um estudo mais aprofundado sobre o dimensionamento de vigas alveoladas foi efetuado no Capítulo 3, tendo sido descritos e discutidos diversos métodos de cálculo para verificação da segurança aos estados limite últimos e de utilização, métodos esses baseados essencialmente nos Eurocódigos e na norma SCI-P355 do Steel Construction Institute. Foram definidos os parâmetros fundamentais para o dimensionamento de vigas alveoladas simplesmente apoiadas e fenómenos associados a este tipo de vigas, como o mecanismo de Vierendeel e a encurvadura da alma entre aberturas, os quais foram abordados de forma minuciosa. Em vigas com aberturas retangulares, é de destacar a importância de efetuar mudanças na sua geometria para reduzir a concentração de tensões nos cantos das aberturas. Em geral, observa-se uma redução significativa de capacidade resistente à flexão e ao corte, devida à existência de mecanismos do tipo viga Vierendeel. Em vigas com aberturas retangulares, é de destacar a importância de efetuar mudanças na sua geometria para reduzir a concentração de tensões nos cantos das aberturas. Em geral, observa-se uma redução significativa de capacidade resistente à flexão e ao corte, devida à existência de mecanismos do tipo viga Vierendeel. No entanto, as aberturas

circulares mostram uma eficiência estrutural superior às retangulares, onde o comprimento e largura efetivos das aberturas são menores, deste modo, existe uma maior capacidade resistente nos esforços de corte e de flexão de Vierendeel, e por consequência, uma menor deformada adicional devida à presença de aberturas.

Foi ainda desenvolvida uma folha de cálculo em Excel para vigas alveoladas, na qual se incorporaram as verificações relevantes para avaliação da segurança aos estados limite últimos e de utilização. Esta ferramenta permitiu identificar e quantificar de modo mais perceptível os fenómenos e os parâmetros geométricos que influenciam o dimensionamento de vigas alveoladas de eixo retilíneo.

Em resumo, foram apresentadas, analisadas e discutidas diversas verificações e modelos estruturais relativos a vigas alveoladas, tendo-se estabelecido metodologias de cálculo para apoio ao dimensionamento deste tipo de elementos. Neste contexto, considera-se que o trabalho realizado se reveste de inegável utilidade, atendendo à crescente competitividade e campo de aplicação de vigas alveoladas.

## **5.2 Desenvolvimentos Futuros**

Para desenvolvimentos futuros, sugere-se o aprofundamento dos seguintes temas:

- Estudo da distribuição de tensões residuais ao longo da alma das vigas alveoladas, considerando as perturbações causadas pelo corte e soldadura desses perfis;
- Estudo detalhado dos efeitos da encurvadura lateral em vigas alveoladas;
- Estudo de metodologias de dimensionamento para vigas alveoladas sujeitas a cargas concentradas;
- Estudo de metodologias de dimensionamento para vigas alveoladas de eixo curvo;
- Análise comparativa da eficiência estrutural de diferentes tipos de reforços em vigas alveoladas.



## Referências Bibliográficas

Abreu, L.M.P.; Fakury, R.H.; Castro e Silva, A.L.R., 2010: Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares. CILAMCE 2010 – XXXI Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering: Argentina.

ArcelorMittal - ACB®, 2008: Arcelor Cellular Beams, Luxembourg.

ArcelorMittal, 2011: Catálogo de Vigas Celulares, Sections and Merchant Bars - Sales Programme, Luxembourg.

Bezerra, E.M.; Fakury R.H.; Castro e Silva A.L.R.; Caldas R.B., 2010: Determinação do momento fletor resistente a flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas. XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural: Argentina.

Bitar, D.; Demarco, T.; Martin, P. O., 2006: Steel and composite cellular beams. Novel approach for design based on experimental studies and numerical investigations, EuroSteel, 2005.

Bradley, T. P., 2003: Stability of castellated beams during erection, Virginia Tech.

Calado, L.; Santos, J., 2010: Estruturas mistas de aço e betão, IST Press.

Catai, E., 2005: Análise dos efeitos da retração e fluência em vigas mistas. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Chung, K. F.; Lawson, R. M., 2001: Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode 4. Journal of Constructional Steel Research, Hong Kong.

Cimadevilla, J.E.; Gutiérrez, E.M.; Rodríguez, J.A.V.; 2000: Vigas Alveoladas. A Coruna: Biblioteca Técnica Universitária.

Cobenge, 2013: XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia.

Costa, G. A. L., 2008: Resistência Última à Flexão de Tabuleiros Mistos Aço-Betão Considerando o Faseamento Construtivo, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Darwin, D., 1990: Steel and Composite Beams with Web Openings. Steel Design Guide 2, American Institute of Steel Construction, Chicago.

Demirdjian, S., 1990: Stability of Castellated Beam Webs. Montreal, Canadá: McGill University.

EN 1994-1-1, 2004: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN - European Committee for Standardization, 2004.

ENV 1993-1-1:1992/A2, 1998: Eurocode 3 - Design of steel, Annex N: Openings in webs, CEN - European Committee for Standardization.

Erdal, F.; Saka, M. J. 2012: Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams, Journal of Constructional Steel Research.

European Commission, 2006: Large web openings for service integration in composite floors: Eurocode design method for composite and non-composite beams with web openings, Research Fund for Coal and Steel.

Gama, F. O. M. et. al., 2010: Simulação numérica de estabilidade lateral de vigas celulares de aço com aberturas na alma de geometria polygonal. Congresso Libero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em engenharia (CILAMCE), Rio de Janeiro.

Gerda Aço Minas, 2011: Vigas Alveolares, Siderurgia Brasileira

Grünbauer BV. Web Page: <http://www.grunbauer.nl/eng/waarom.htm>.

INSDAG –Institute for Steel Development & Growth, 2006: Steel beams with web openings.

Kerdal, D.; Nethercot D.A., 1984: Failure modes for castellated beams, Journal of Constructional Steel Research.

Lawson, R. M.; Hicks, S. J. SCI-P355, 2011: Design of composite beams with large web openings: in accordance with Eurocodes and the UK National Annexes, Steel Construction Institute.

Lawson, R. M.; Lim, J.; Hicks, S. J.; Simms, W. I., 2006: Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings, Journal of Constructional Steel Research.  
NP EN 1990, 2009: Eurocódigo 0 - Bases para o projeto de estruturas, Instituto Português da Qualidade.

Nadjai, A.; Goodfellow, N.; Vassart, O.; Ali, F.; Choi, S., 2008: Simple calculation method of composite cellular beams at elevated temperatures. Fifth International Conference on Structures in Fire.

NP EN 1991-1-1, 2009: Eurocódigo 1 - Ações em estruturas - Parte 1-1: Ações gerais, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1992-1-1, 2010: Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1993-1-1, 2010: Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Instituto Português da Qualidade.

Oliveira, L. B., 2011: Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura. Universidade Federal de Viçosa.

Oliveira, T. C.P., 2012: Vigas alveoladas: metodologias de dimensionamento, Universidade de Aveiro.

Paiva, C. 2009: Vigas Casteladas e Celulares - Estruturas Metálicas com mais Resistência, menos Deformação e Redução do Peso Próprio. Publicado originalmente em Finestra, Edição 59.

Radic, I; Markulak, D.; Varevac, D.,2008: Numerical Simulation of Lateral Stability of Castellated Beams. EUROSTEEL, Áustria.

Rodrigues, F., 2007: Comportamento Estrutural de Vigas de Aço com Abertura na Alma, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Sabarish, J.; Biju, V., 2010: Web buckling of castellated beams. ICTT Civil Engineering Papers.

Silveira, E. G., 2011: Avaliação do comportamento estrutural de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação, Universidade Federal Viçosa.

Smith, A. L.; Hicks, S. J.; Devine, P. J., 2009: SCI-P354: Design of Floors for Vibration: A New Aproach, Steel Construction Institute.

Tsavdaridis, K.D. e D'mello, C., 2011: Finite Element Investigation on Web-Post Buckling of Perforated Steel Beams with Various Web Opening Shapes subjected under different shear moment interaction, 6th European.Conference on Steel and Composite Structures.

Veríssimo, G. S., 1996: Análise e Comportamento de Vigas de Aço e Vigas Mistas com Aberturas na Alma, Universidade Federal de Minas Gerais.

Veríssimo, G. S.; Vieira, B. W.; Silveira, E. G.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Bezerra E. M.; Silva, A. L. R. C., 2013: Estados limites aplicados às vigas alveolares de aço, Universidade Federal de Viçosa.

Vieira, W. B., 2011: Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma, Universidade Federal Viçosa.

Westok, 2008: Engineers Design Guide: Cellular Beam

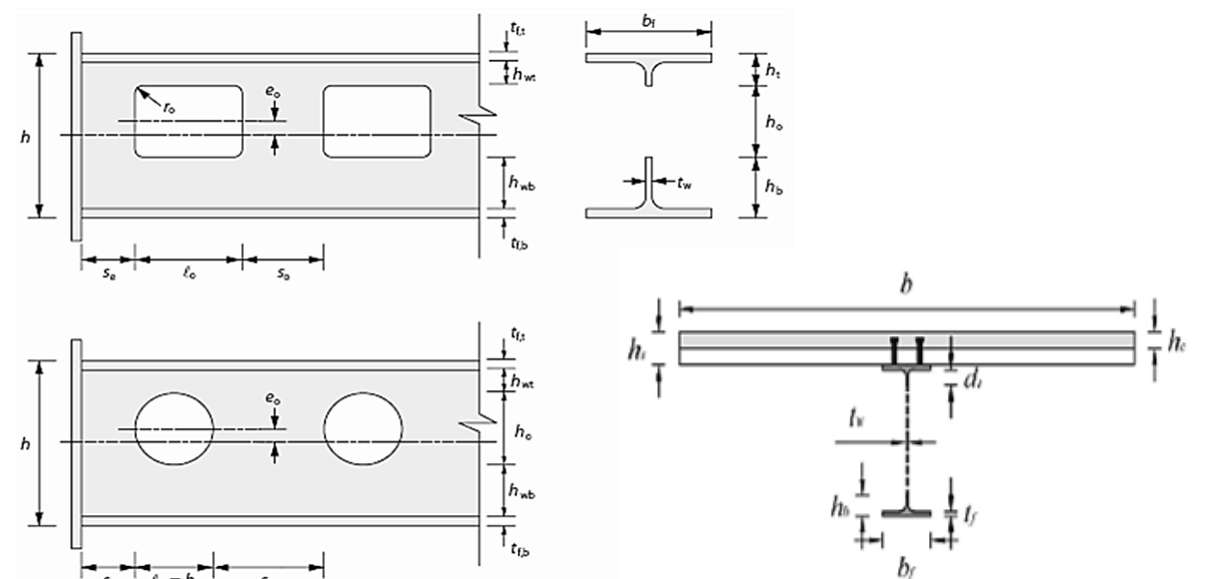
Wong, V. B.; Burgess, I.; Plank, R., 2010: Behavior of composite cellular steel- Concrete beams at elevated temperatures.



## **Anexos**







| Dados  |                         | Perfil IPE 450 |                       |
|--|-------------------------|----------------|-----------------------|
| Comprimento do vão da viga ( $L$ )                     | 12,0 m                  | $h$            | 591,7 mm              |
| Largura de influência da viga ( $b$ )                  | 3,0 m                   | $b_f$          | 190,0 mm              |
| Altura da laje de betão ( $h_s$ )                      | 140 mm                  | $t_w$          | 9,4 mm                |
| Altura da chapa perfilada ( $h_p$ )                    | 60 mm                   | $t_f$          | 14,6 mm               |
| Altura de betão acima da chapa perfilada ( $h_c$ )     | 80 mm                   | $r$            | 21 mm                 |
| Área transversal da chapa perfilada ( $A_p$ )          | 1334 mm <sup>2</sup> /m | $A$            | 112,1 cm <sup>2</sup> |
| Largura da nervura menor ( $b_1$ )                     | 60 mm                   | $I_y$          | 63034 cm <sup>4</sup> |
| Largura da nervura maior ( $b_2$ )                     | 105 mm                  | $W_{pl,y}$     | 2449 cm <sup>3</sup>  |
| Espessura da chapa perfilada ( $t$ )                   | 1,0 mm                  | $G$            | 0,73 kN/m             |
| Distância transversal entre nervuras ( $S_{sc,l}$ )    | 205 mm                  |                |                       |
| Diâmetro da cabeça dos conectores de corte ( $d$ )     | 19 mm                   |                |                       |
| Altura do pino dos conectores de corte ( $h_{sc}$ )    | 125 mm                  |                |                       |
| Espaçamento transversal entre conectores ( $s_t$ )     | 90 mm                   |                |                       |
| Tipo de aberturas                                      | Circular                |                |                       |
| Número de aberturas na viga alveolada ( $n_o$ )        | 27 aberturas            |                |                       |
| Diâmetro das aberturas ( $d_o$ )                       | 320 mm                  |                |                       |
| Distância entre aberturas ( $s_o$ )                    | 110,0 mm                |                |                       |
| Distância entre a abertura 1 e a extremidade ( $s_e$ ) | 250,0 mm                |                |                       |
| Altura da secção em T ( $h_T$ )                        | 135,85 mm               |                |                       |
| Altura da abertura retangular ( $h_o$ )                | 320 mm                  |                |                       |
| Comprimento da abertura retangular ( $l_o$ )           | 320 mm                  |                |                       |

| Perfil IPE 450 |                       |
|----------------|-----------------------|
| $h$            | 591,7 mm              |
| $bf$           | 190,0 mm              |
| $tw$           | 9,4 mm                |
| $tf$           | 14,6 mm               |
| $r$            | 21 mm                 |
| $A$            | 112,1 cm <sup>2</sup> |
| $I_y$          | 63034 cm <sup>4</sup> |
| $W_{pl,y}$     | 2449 cm <sup>3</sup>  |
| $G$            | 0,73 kN/m             |

| Dimensões                           | Tipo de abertura |              |
|-------------------------------------|------------------|--------------|
|                                     | Circular         | Retangular   |
| Largura máxima da abertura          | Verifica         | Verifica     |
| Altura mínima das secções em T      | Verifica         | Verifica     |
| Rácio máximo da altura dos T's      | Verifica         | Verifica     |
| Comprimento máximo da abertura      | -----            | Verifica     |
| Distância mínima entre aberturas    | Verifica         | Não Verifica |
| Raio mínimo do canto da abertura    | -----            | Verifica     |
| Distância da abertura à extremidade | Verifica         | Não Verifica |

## 2. Propriedades dos Materiais e Ações

| Materiais           |            |                         |
|---------------------|------------|-------------------------|
| Aço S275            | $f_y$      | 275 MPa                 |
|                     | $\epsilon$ | 0,92                    |
|                     | $E_s$      | 210 GPa                 |
| Betão C30/37        | $f_{ck}$   | 30 MPa                  |
|                     | $E_{cm}$   | 33 GPa                  |
| Conectores de corte | $f_y$      | 350 MPa                 |
|                     | $f_u$      | 450 MPa                 |
| Armadura A500       | $f_{y,d}$  | 435 MPa                 |
| Chapa nervurada H60 | $f_{yp,d}$ | 320 MPa                 |
|                     | $A_p$      | 1334 mm <sup>2</sup> /m |

| Ações       |                     | Fase Mista | Fase de Construção |
|-------------|---------------------|------------|--------------------|
| Permanentes | PP perfil de aço    | 0,73 kN/m  | 0,73 kN/m          |
|             | PP chapa perfilada  | 0,30 kN/m  | 0,30 kN/m          |
|             | PP armadura         | 0,10 kN/m  | 0,10 kN/m          |
|             | PP laje de betão    | 7,35 kN/m  | -----              |
|             | Restantes cargas    | 4,50 kN/m  | -----              |
| Variáveis   | Sobrecarga          | 15,00 kN/m | -----              |
|             | Carga de construção | -----      | 6,00 kN/m          |
|             | PP betão húmido     | -----      | 8,09 kN/m          |
| Total       | Carga permanente    | 12,98 kN/m | 1,13 kN/m          |
|             | Carga variável      | 15,00 kN/m | 14,09 kN/m         |

### 2.1 Carregamento para os Estados Limite Últimos e de Utilização

| Carregamento E.L.Últimos |                 |            | Carregamento E.L.Utilização |                                 |            |
|--------------------------|-----------------|------------|-----------------------------|---------------------------------|------------|
| Fase Mista               |                 |            | Fase Mista                  |                                 |            |
| $\gamma_G=1,35$          | $\gamma_Q=1,50$ | 40,03 kN/m | $\gamma_G=1,00$             | $\psi 1,1 \times \gamma_Q=0,50$ | 20,48 kN/m |
| Fase de Construção       |                 |            | Fase de Construção          |                                 |            |
| $\gamma_G=1,35$          | $\gamma_Q=1,50$ | 22,66 kN/m | $\gamma_G=1,00$             | $\gamma_Q=1,00$                 | 15,22 kN/m |

### 2.2 Esforços de Dimensionamento Para Estados Limite Últimos

| Viga Simplemente Apoiada  |             |                           |             |
|---------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
| Fase de Construção        |             | Fase Mista                |             |
| Med meio vão              | 407,83 kN.m | Med meio vão              | 720,49 kN.m |
| Ved apoio                 | 135,94 kN   | Ved apoio                 | 240,16 kN   |
| Posição abertura 1        | $x=0,41$ m  | Posição abertura 1        | $x=0,41$ m  |
| Med abertura 1            | 53,83 kN.m  | Med abertura 1            | 95,10 kN.m  |
| Ved abertura 1            | 126,65 kN   | Ved abertura 1            | 223,75 kN   |
| Ved entre aberturas 1 e 2 | 113,13 kN   | Ved entre aberturas 1 e 2 | 217,35 kN   |

### 3. Classificação da Secção Transversal da Viga Alveolada

#### 3.1 Classe dos Banzos

|                                   |                |                        |                       |
|-----------------------------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| $c/t_f < 9\varepsilon$ - Classe 1 | $c/t_f = 6,01$ | $9\varepsilon = 8,28$  | O Banzo é de Classe 1 |
| $c/t < 10\varepsilon$ - Classe 2  |                | $10\varepsilon = 9,20$ |                       |

#### 3.2 Classe da Alma

|  |                              |                             |                      |
|--|------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| $l_{o,eff} < 32\varepsilon t_w$ - Classe 2 | $l_{o,eff} = 224,0\text{mm}$ | $32\varepsilon t_w = 276,7$ | A Alma é de Classe 2 |
| $l_{o,eff} < 36\varepsilon t_w$ - Classe 3 | $l_{o,eff} = 224,0\text{mm}$ | $36\varepsilon t_w = 311,3$ |                      |

Logo a Secção Transversal da Viga Alveolada é de Classe 2

### 4. Conexão de Corte

#### 4.1 Coeficiente de relação entre altura e diâmetro dos conectores, $\alpha$

$$h_{sc}/d = 6,58$$

$$\text{Logo } \alpha = 1$$

#### 4.2 Resistência ao corte de cada conector, $P_{Rd}$

$$P_{Rd} = 81,66 \text{ kN}$$

$$\text{com } \gamma_v = 1,25$$

#### 4.3 Redução da resistência ao corte devida à orientação da chapa perfilada

##### 4.3.1 Fator de redução $k_t$ para chapa perfilada com nervuras perpendiculares à viga alveolada

Número de Conectores por Nervura ( $n_r$ )=2

$$K_t = 0,74 < k_{t\max} \text{ (Ver Quadro 6.2 da Norma EN1994-1-1)}$$

$$K_{t\max} = 0,70$$

##### 4.3.2 Fator de redução $k_l$ para chapa perfilada com nervuras paralelas à viga alveolada

$$K_l = 0,89 < 1,0$$

Logo, resistência ao corte de cada conector,  $P_{Rd} = 57,16 \text{ kN}$

#### 4.4 Distribuição dos conectores de corte na viga alveolada

| Distribuição dos Conectores de Corte                          |            |    |
|---|------------|----|
| Conectores entre a extremidade e o centro da abertura 1       | $n_{sc}$   | 4  |
| Conectores acima da abertura 1                                | $n_{sc,o}$ | 2  |
| Conectores entre as aberturas 1 e 2                           | $n_{sc,s}$ | 4  |
| Conectores entre a extremidade e o centro da abertura 14      | $n_{sc}$   | 59 |
| Conectores acima da abertura 14                               | $n_{sc,o}$ | 2  |
| Altura mínima dos conectores, segundo a EN 1994-1-1           | Verifica   |    |
| Espaçamento transversal dos conectores, segundo a EN 1994-1-1 | Verifica   |    |

#### 4.5 Propriedades geométricas da secção em T

| Propriedades Geométricas da Secção em T                                 |                       |
|---|-----------------------|
| Altura equivalente de abertura ( $h_{eo}$ )                             | 144,00 mm             |
| Comprimento equivalente da abertura ( $l_e$ )                           | 288,00 mm             |
| Altura da secção em T ( $h_T$ )   | 135,85 mm             |
| Altura da alma da secção em T ( $h_{wT}$ )                              | 121,25 mm             |
| Área de cada secção em T ( $A_t$ )                                      | 41,01 cm <sup>2</sup> |
| Área do banzo da secção em T ( $A_{f,T}$ )                              | 27,74 cm <sup>2</sup> |
| Área da alma da secção em T ( $A_{w,T}$ )                               | 11,40 cm <sup>2</sup> |
| Posição do eixo neutro elástico a partir do banzo superior ( $z_{el}$ ) | 27,08 mm              |
| Altura efetiva entre os centros de massa dos T's ( $h_{eff}$ )          | 537,54 mm             |

### 5. Grau de Conexão de Corte

#### 5.1 Resistência à compressão da laje de betão

$$b_{eff} = 3,0 \text{ m}$$

$$N_{c,s,Rd} = 4080,0 \text{ kN}$$

$$\gamma_c = 1,5$$

#### 5.2 Resistência à tração das secções em T do perfil de aço

$$N_{a,Rd} = 2255,28 \text{ kN}$$

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

$N_{a,Rd} < N_{c,s,Rd} \rightarrow$  o eixo neutro plástico encontra-se na secção de betão

#### 5.3 Grau mínimo de conexão de corte

$$\eta = 0,827$$

Para um vão inferior a 25 metros, o grau mínimo de conexão com pares de conectores é:

$$\eta \geq 0,497$$

Satisfaz o grau de conexão mínimo

## 6. Momento Fletor Resistente na Abertura a Meio Vão

### 6.1 Resistência à tração do T inferior

$$N_{bT,Rd} = 1127,64 \text{ kN}$$

### 6.2 Resistência à compressão da laje de betão

$$N_{c,Rd} = 3372,41 \text{ kN}$$

$N_{c,Rd} > N_{bT,Rd} \rightarrow$  o eixo neutro plástico encontra-se na laje de betão

### 6.3 Momento fletor resistente

$$M_{o,Rd} = 1511,24 \text{ kN.m}$$

### 6.4 Esforço de tração atuante no T inferior

$$N_{b,T,Ed} = 1072,86 \text{ kN}$$

Verifica o bom funcionamento da secção mista

## 7. Momento Fletor Resistente na Abertura 1

### 7.1 Resistência à tração do T inferior

$$N_{bT,Rd} = 1127,64 \text{ kN}$$

### 7.2 Resistência à compressão da laje de betão

$$N_{c,Rd} = 228,64 \text{ kN}$$

$N_{c,Rd} < N_{bT,Rd} \rightarrow$  o eixo neutro plástico encontra-se na secção de aço

### 7.3 Momento fletor resistente

$$M_{o,Rd} = 635,20 \text{ kN.m}$$

### 7.4 Esforço de tração atuante no T inferior

$$N_{b,T,Ed} = 122,87 \text{ kN}$$

Verifica o bom funcionamento da secção mista

## 8. Armadura Transversal

### 8.1 Armadura de controlo da fendilhação do betão

Existe escoramento da laje de betão ?

Não

$A_{s,min}=A_{sl}=1,60 \text{ cm}^2/\text{m}$  Adoptar:  $\varnothing 8//0,20$  Com,  $A_{s,ef}= 2,51 \text{ cm}^2/\text{m}$

Ver Quadros 7.1 e 7.2 para verificação direta da fendilhação

### 8.2 Resistência ao corte longitudinal do betão

Ângulo da Escora Comprimida do Banzo de Betão com o Eixo Longitudinal da Viga,  $\theta= 45^\circ$

$$\frac{A_{sf} f_{yd}}{s_f} + A_p f_{yp,d} = 536,01 \text{ kN} \quad \frac{v_{Ed} h_f}{\cot \theta} = 278,83 \text{ kN}$$

Verifica a resistência ao corte longitudinal do betão

### 8.3 Resistência ao esmagamento das escoras comprimidas do banzo de betão

$$v_{Ed} = 3,49 \text{ MPa} \quad v_{0,85 f_{cd} \sin \theta \cos \theta} = 4,49 \text{ MPa}$$

Verifica a resistência ao esmagamento das escoras comprimidas do banzo de betão

## 9. Esforço Transverso na Abertura 1

### 9.1 Esforço transverso resistente do T superior e inferior

$$\text{Área de corte } A_v = 17,02 \text{ cm}^2 \quad V_{pl,b,Rd} = V_{pl,t,Rd} = 270,18 \text{ kN}$$

### 9.2 Esforço transverso resistente da laje de betão

$$V_{c,Rd} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \geq [v_{min} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$$

Onde:

$$\begin{aligned} b_w &= 400 \text{ mm} & k_1 &= 0,15 \\ C_{Rd,c} &= 0,12 & \sigma_{cp} &= 0 \text{ MPa} \\ k &= 2,00 & b_{eff,o} &= 2,4 \text{ m} \\ A_{sl} &= 251 \text{ mm}^2/\text{m} & d &= 80 \text{ mm} \\ \rho_l &= 0,0031 & v_{min} &= 0,542 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Esforço transverso resistente da laje de betão,  $V_{c,Rd} = 17,35 \text{ kN}$

Esforço transverso resistente total da secção transversal,  $V_{Rd} = 557,72 \text{ kN}$

## 10. Momento Fletor de Vierendeel na Abertura 1

A Distribuição do esforço transversal para cada secção em T, é de 50%

$$\rho=0,41$$

Não é Necessário Reduzir a Espessura da Alma

$$t_w = 9,40 \text{ mm}$$

### 10.1 Momento Fletor Resistente Plástico Para Classes 1 e 2

$$M_{pl,Rd} = \frac{A_{w,T} f_y}{\gamma_{M0}} \left( \frac{h_{w,T}}{2} + t_f - z_{pl} \right) + \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} \left( \frac{t_f}{2} - z_{pl} + \frac{z_{pl}^2}{t_f} \right)$$

Onde:

$$z_{pl} = 10,299 \text{ mm}$$

$$M_{pl,Rd} = M_{tT,pl,Rd} = 23,60 \text{ kN.m}$$

#### 10.1.1 Redução do Momento Fletor Resistente Plástico do T Inferior

$$M_{bT,NV,Rd} = 23,32 \text{ kN.m}$$

### 10.2 Momento Fletor Resistente Elástico Para Classes 3 e 4

$$M_{el,Rd} = \frac{A_{w,T} f_y \left( \frac{h_{w,T}}{2} + t_f - z_{el} \right)^2 + A_f f_y \left( z_{el} - \frac{t_f}{2} \right)^2}{h_{w,T} + t_f - z_{el}}$$

Onde:

$$z_{el} = 27,081 \text{ mm}$$

$$M_{el,Rd} = M_{tT,el,Rd} = 9,42 \text{ kN.m}$$

#### 10.2.1 Redução do Momento Fletor Resistente Elástico do T Inferior

$$M_{bT,NV,Rd} = 8,40 \text{ kN.m}$$

### 10.3 Momento Fletor Resistente Devida à Interação do T Superior com a Laje de Betão

$$M_{vc,Rd} = 12,99 \text{ kN.m}$$

### 10.4 Verificação do Momento Fletor de Vierendeel

$$V_{Ed} l_{\theta} \leq 2M_{bT,NV,Rd} + 2M_{tT,NV,Rd} + M_{vc,Rd}$$

Onde:

$$M_{bT,NV,Rd} = 23,32 \text{ kN.m}$$

$$M_{vc,Rd} = 12,99 \text{ kN.m}$$

$$M_{tT,NV,Rd} = 23,60 \text{ kN.m}$$

$$V_{Ed} = 223,75 \text{ kN}$$

Verifica a Resistência ao Momento de Vierendeel na Abertura

## 11. Esforço de Corte Longitudinal na Secção Entre Aberturas

$V_{wp,Ed} = 140,62 \text{ kN}$  Valor Calculado Para a Situação de Conexão Total

$V_{wp,Rd} = 164,17 \text{ kN}$

Verifica a resistência ao corte longitudinal entre aberturas

## 12. Momento Fletor Elástico na Secção Entre Aberturas

$M_{wp,Ed} = 0,00 \text{ kN.m}$  Em aberturas centradas na alma da viga

$M_{wp,Rd} = 5,21 \text{ kN.m}$

Verifica a resistência à flexão entre aberturas

## 13. Encurvadura da Alma na Secção Entre Aberturas

Força de compressão = força de corte longitudinal entre aberturas

$V_{wp,Ed} = N_{wp,Ed} = 140,62 \text{ kN}$

$$N_{wp,Rd} = \chi \frac{s_o t_w f_y}{\gamma_{M1}}$$

Onde:

$\lambda = 0,726$

$\alpha = 0,34$  (Curva de encurvadura b, para perfil laminado)

$\Phi = 0,853$

$\chi = 0,769$

Logo,  $N_{wp,Rd} = 218,66 \text{ kN}$

Verifica a resistência à encurvadura da alma entre aberturas

## 14. Restrição do Esforço Transverso

### 14.1 Restrição do esforço transverso por flexão entre aberturas

$V_{Rd} = 374,54 \text{ kN}$  Em aberturas circulares

$V_{Rd} = 265,52 \text{ kN}$  Em aberturas retangulares

### 14.2 Restrição do esforço transverso por encurvadura entre aberturas

$V_{Rd} = 337,73 \text{ kN}$

O esforço transverso é limitado por: 337,73 kN



## 15. Faseamento Construtivo

Durante a fase de construção, a resistência da laje de betão é desprezada

### 15.1 Momento fletor resistente plástico

Momento fletor resistente plástico da viga sem aberturas,  $M_{Rd} = 673,48 \text{ kN.m}$

Momento fletor resistente plástico da viga com uma abertura  $M_{o,Rd} = 629,36 \text{ kN.m}$

Esforço de tração atuante no T inferior devido ao momento,  $N_{b,T,Ed} = 758,69 \text{ kN}$

Verifica a resistência à flexão durante a fase de construção

### 15.2 Momento fletor de Vierendeel

Momento fletor de Vierendeel atuante,  $M_{v,Ed} = 36,48 \text{ kN.m}$

Momento fletor de Vierendeel resistente,  $M_{bT,NV,Rd} = 93,67 \text{ kN.m}$

Verifica a resistência à flexão de Vierendeel durante a fase de construção

## 16. Estados Limite de Utilização

### 16.1 Deformação

A viga e a laje são escoradas durante a construção?

Não

#### 16.1.1 Deformação na fase de construção (secção de aço)

$g_k = 9,22 \text{ kN/m}$

$\delta_b = 18,80 \text{ mm}$

#### 16.1.2 Deformação na fase mista (secção mista)

$q_k = 19,50 \text{ kN/m}$

$\delta_c = 14,48 \text{ mm}$

#### 16.1.3 Deformação adicional devida à existência de aberturas

$\delta_{add} = 6,12 \text{ mm}$

Com  $K_o = 1,50$  Para Viga Alveolada Mista

A Deformação Adicional Representa 15,5% da Deformação Total

Deformação total,  $\delta_{Total} = 39,40 \text{ mm}$ , equivalente a  $L/305$

Verifica o limite de deformação de  $L/250$

## 16.2 Vibração

Para edifícios da categoria B, o fator  $\psi 1,1$  da combinação característica toma o valor de 0,5.  
A frequência natural mínima admissível é de 3Hz.

$$\begin{aligned} q_k &= 20,48 \text{ kN/m} & \delta_v &= 15,39 \text{ mm} \\ E_{c,dyn} &= 38 \text{ GPa} \\ \eta &= 5,53 \end{aligned}$$

A frequência natural é dada por:  $f = \frac{17,8}{\sqrt{\delta_v}} = 4,54 \text{ Hz}$

A frequência natural é superior ao mínimo admissível

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Grau mínimo de conexão de corte                               | $\eta=0,827 \geq 0,497$             |
| <b>Estados Limite Últimos</b>                                 |                                     |
| Momento fletor global na abertura 14                          | 0,477 <1                            |
| Esforço axial do T inferior na abertura 14                    | 0,951 <1                            |
| Esforço de corte longitudinal do betão                        | 0,520 <1                            |
| Esmagamento das escoras comprimidas do banzo de betão         | 0,777 <1                            |
| Esforço transversal na abertura 1                             | 0,401 <1                            |
| Momento fletor de Vierendeel na abertura 1                    | 0,603 <1                            |
| Esforço de corte longitudinal entre aberturas                 | 0,857 <1                            |
| Esforço transversal por encurvadura ou flexão entre aberturas | 0,663 <1                            |
| Encurvadura da alma na secção entre aberturas                 | 0,643 <1                            |
| Momento fletor resistente na fase de construção               | 0,648 <1                            |
| Esforço axial no T Inferior na fase de construção             | 0,673 <1                            |
| Momento fletor de Vierendeel na fase de construção            | 0,389 <1                            |
| <b>Estados Limite de Utilização</b>                           |                                     |
| Deformação em fase de construção (secção de aço)              | $\delta_b = 18,80 \text{ mm}$       |
| Deformação em fase mista (secção mista)                       | $\delta_c = 14,48 \text{ mm}$       |
| Deformação adicional devida à existência de aberturas         | $\delta_{add} = 6,12 \text{ mm}$    |
| Deformação total da viga alveolada                            | $\delta_{Total} = 39,40 \text{ mm}$ |
| Vibração (frequência natural)                                 | $f = 4,54 \text{ Hz}$               |